



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

VILLE HAUTALA

LASERMIKROTYÖSTÖN REAALIAIKAINEN PINNANSEURANTA-
JÄRJESTELMÄ

Diplomityö

Tarkastajat: professori Reijo Tuokko ja
tekniikan lisensiaatti Jorma Vihinen
Tarkastajat ja aihe hyväksytty
Automaatio-, kone- ja materiaalitekniikan
tiedekunnassa 9.11. marraskuuta
2011

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Automaatiotekniikan koulutusohjelma

HAUTALA, VILLE: Lasermikrotyöstön reaaliaikainen pinnanseurantajärjestelmä

Diplomityö, 64 sivua, 4 liitesivua

Kesäkuu 2012

Pääaine: Koneteollisuuden tuotantotekniikka

Tarkastajat: professori Reijo Tuokko ja tekniikan lisensiaatti Jorma Vihinen

Avainsanat: Fokuspisteen säätö, pinnan seuranta, lasermikrotyöstö

Monissa mikrotyöstösovelluksissa laserin fokuskorkeuden tarkka hallinta on edellytys työstöprosessin onnistumiselle. Usein työkappaleen pinnanvaihtelut ovat suurempia kuin laserin syväterävyysalue, mikä johtaa epätasaiseen työstölaatuun tai prosessin epäonnistumiseen. Ongelman ratkaisemiseksi kehitettiin korkeudensäätöjärjestelmä, joka mittaa työkappaleen pintaa reaaliaikaisesti ja muuttaa lasersäteen fokuoivan optiikan paikkaa mittaustulosten perusteella.

Testilaitteisto rakennettiin korkeudenseurantajärjestelmän toimintaperiaatteen arviointia sekä konfokaali- ja kolmiomittausanturien pinnanmittaustestejä varten. Näiden pohjalta rakennettiin toimiva prototyyppi suorituskyky- ja työstötestejä varten. Prototyyppi oli suunniteltu tasomaisille työkappaleille, joiden pinnanvaihtelu pysyy 400 µm sisällä. Työkappaleiden pinta-alalle ei ollut rajoituksia, mutta työstöradat olivat rajoitettu suoriin viivoihin. Työkappaleen pinnan mittaamiseen käytettiin optisia paikka-antureita ja pietsosähköisellä toimilaitteella siirrettiin optiikkaa. Pinnanmittaus suoritettiin työstöliikkeen aikana ennen työstökohtaa, jotta toimilaitteelle jää riittävästi aikaa reagoida pinnankorkeuden vaihteluihin.

Prototyypin kykyä mukautua eri liikenopeuksiin testattiin käyttämällä nopeuksia väliltä 100 - 1700 mm/s pinnanvaihtelun ollessa yli 300 µm. Lisäksi alustavia työstötestejä tehtiin käyttäen teräs-, pii- ja safiirilevyjä, joita oli kallistettu hieman. Työstömatkat vaihtelivat 50 mm ja 150 mm välillä. Liikenopeuksia testattaessa laserin fokuskorkeuden vaihtelu pystyttiin pitämään 13 µm sisällä riippumatta nopeudesta. Materiaalin prosessointi onnistui koko työstöpinta-alalle huolimatta pinnanvaihteluista, ja ilman työkappaleiden tarkoituksellista kallistustakin saatiin työstö onnistumaan laajemmalla alalla verrattuna ilman korkeudensäätöä tehtyyn työstöön.

Suurin havaittu ongelma prototyypissä oli aaltomainen heilunta, mikä aiheutti fokuskorkeuden siirtymisen jaksoittain toivotun fokuskorkeuden ylä- tai alapuolelle. Tämä oli seurausta tukirakenteiden riittämättömästä jäykkyydestä sekä antureiden ja toimilaitteen suorituskyvyn jäämisestä odotettua heikommaksi.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Automation Engineering

HAUTALA, VILLE: Real Time Surface Tracking System in Laser Micromachining

Master of Science Thesis, 64 pages, 4 Appendix pages

June 2012

Major: Production Engineering

Examiners: Professor Reijo Tuokko and Licentiate of Science in Technology

Jorma Vihinen

Keywords: Focus height control, surface tracking, laser micromachining

In many micromachining applications, precise laser height focus control is essential for the process success. Often workpiece surface changes are significantly greater than the laser's depth of focus, which leads to uneven machining quality or the failure of the machining process. To resolve this problem a surface tracking system has been developed that measures the workpiece surface in real time and changes the focusing optics position according to the measurement results.

A test setup was built for the working principle evaluation and to test if confocal and triangular types of sensors are suitable for the surface measurement. Based on the first tests, a prototype was constructed and used for the machining and performance tests. The prototype was designed for planar workpieces in which surface variation is below 400 μm . There were no limitations for the workpiece area, but machining paths were restricted for straight lines. Optical position sensors were used for the surface measurement and a piezoelectric actuator was used for displacement of the optics. The surface measurement was done during machining movement before the laser beam. The beforehand measurement provides sufficient time for the actuator to react on the surface height variations.

Tests were made using machining speeds from 100 mm/s up to 1700 mm/s while the surface variance was over 300 μm . Preliminary machining tests were made using steel, silicon and sapphire plates that were slightly tilted. Machining distances varied from 50 mm to 150 mm. When testing the different moving speeds, the laser focus height variance was maintained under 13 μm range regardless of the moving speed. The laser material processing was successful in the entire working area despite of the large surface variance. Machining process was successful in wider area compared to machining done without the surface tracking even without tilting the workpieces,

The biggest issue in the prototype was wavelike motion that caused the focus height shift periodically slightly below or above the desired focus height. This was due to insufficient supporting structure rigidity and the sensors and the actuator not reaching to the expected performance level.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisellä yliopistolla tuotantotekniikan laitoksella osana LASEAL-projektia. LASEAL-projektissa tutkitaan lasertekniikan soveltuvuutta mikrosysteemien kansitukseen ja pakkaamiseen kiekko- ja sirutasolla. Projektissa ovat mukana Tampereen teknillinen yliopisto, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, VTT, VTI Technologies, Okmetic ja Solarprint.

Kiitän työni tarkastajia Prof. Reijo Tuokkoa ja TkL Jorma Vihistä työn ohjauksesta ja asiantuntevasta palautteesta. Lisäksi haluaisin kiittää kaikkia muita projektiin osallistuneita avusta ja etenkin Primoceler Oy:tä ja Antti Määttäistä, Ville Hevonkorpea ja Asser Vuolaa avusta prototyypin rakentamisessa ja mahdollisuudesta suorittaa testejä Primocelerin tiloissa. Diplomityön kirjoittamiseen ja rakenteeseen olen saanut monia hyviä neuvoja ja ideoita kollegoiltani Assi Hansenilta ja Tero Kumpulaiselta.

Tampereella 14.5.2012

Ville Hautala

SISÄLLYS

1	Johdanto	1
2	Lasermikrotyöstö, optinen mittaus ja pietsosähköiset toimilaitteet	3
2.1	Valo ja laser.....	3
2.1.1	Laserin fokusointi	3
2.1.2	Valon taittuminen ja heijastuminen	4
2.2	Lasermikrotyöstö.....	6
2.3	Optinen mittaus	7
2.3.1	Interferometria	7
2.3.2	Kolmionmittaus	9
2.3.3	Konfokaalimittaus.....	9
2.4	Pietsosähköiset toimilaitteet.....	11
2.4.1	Toimintaperiaate	11
2.4.2	Toimilaitteet.....	12
2.4.3	Dynaaminen toiminta.....	14
3	Laitteet ja ohjelmat.....	16
3.1	Toimilaitteen ja mittaustavan valinta	16
3.1.1	Toimilaitteen valinta	16
3.1.2	Mittaustavan valinta ja toimilaitteen ohjaus	17
3.1.3	Mittaustavan vaikutus työstöaikaan.....	21
3.2	Ensimmäiset laitteistotestit.....	24
3.3	Prototyyppi.....	27
3.4	Ohjelmisto	29
3.4.1	Alustustoimenpiteet	30
3.4.2	Mittaus ja toimilaitteen ohjaus.....	31
3.4.3	Käyttöliittymä	32
4	Mittaus ja testausjärjestelyt	34
4.1	Anturitestit	34
4.1.1	Anturit ja mittausjärjestelyt	34
4.1.2	Mitattavat näytteet	35
4.1.3	Anturien asetukset ja säädettävyys	36
4.1.4	Mittaukset	37
4.2	Ensimmäiset laitteistotestit.....	38
4.3	Prototyyppi.....	39
5	Tulosten tarkastelu	41
5.1	Anturit	41
5.2	Ensimmäiset laitteistotestit.....	48
5.3	Prototyyppi.....	51
5.3.1	Mekaaninen rakenne ja säätövarat	51
5.3.2	Toimilaite ja anturit	52
5.3.3	Nopeustestit	56

5.3.4	Materiaalintyöstö	57
6	Yhteenveto	60
	Lähteet.....	62
	Liite 1: Liikenopeuden ja –matkan vaikutus työstöaikoihin.....	65
	Liite 2: Nopeustestien tulokset.....	66

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Aallonpituus, λ	Sähkömagneettisen säteilyn ominaisuus
K-luku	Raakasäteen laatua ilmaiseva luku, joka on arvoltaan aina alle yksi
CO ₂ -laser	Laseroivana väliaineena käytetään hiilidioksidi kaasua ja tuotetun säteen aallonpituus on tyypillisesti 10600 nm.
Nd:YAG laser	Laseroivana väliaineena käytetään Nd:YAG kidettä ja tuotetun säteen aallonpituus on tyypillisesti 1064 nm.
Excimer laser	Laseroivana väliaineena käytetään jalo- ja halogeeni kaasujen yhdistelmiä. Tuotettu aallonpituus riippuu kaasujen yhdistelmästä, mutta tyypillisimpiä aallonpituuksia ovat 193 nm, 248 nm ja 308 nm.
Kuitulaser	Laseroivana väliaineena käytetään seostettua kuitua
CMOS-kenno	Kameroissa käytettävän valoherkän kennon tyyppi (complementary metal oxide semiconductor)
USB-väylä	Tiedonsiirtoväylä (Universal Serial Bus)
Polttopiste	Polttopisteessä fokusoidun säteen halkaisija on pienimmillään ja tehotiheys suurimmillaan
Syväterävyys	Fokusoidun polttopisteen pituus säteen suunnassa
Kulmasekunti	Tasokulman yksikkö (1/3600 astetta)
PI-säätäjä	Proportional-integral-säädin, joka muodostuu suhde osasta P ja integroivasta osasta I
PCI-väylä	Väylän kautta voidaan liittää lisälaitteita tietokoneeseen (Peripheral Component Interconnect)
Bessel-suodin	Alipäästösuodin, jonka hyvinä ominaisuuksina on lähes lineaarinen vaihevaste ja vähäinen särön määrä suodatettavaan signaaliin

1 JOHDANTO

Mikrotyöstöprosessit ovat yleistyneet tuotteiden miniatyrisoinnin myötä, ja tarve pienten ja tarkkojen muotojen valmistukseen on kasvanut. Yhtenä vaihtoehtona työstöön on laser, jota tyypillisesti käytetään höyrystämään pieniä määriä materiaaleja tai liittämään materiaaleja yhteen hitsaamalla. Piirteiden koon ollessa mikrometriluokassa korostuu lasersäteen ohjattavuus ja kohdistaminen tarkasti haluttuun paikkaan. Tässä työssä keskitytään mikrotyöstösovelluksiin, joissa lasersäteen syvyysterävyysalue on kapea. Syväterävyydellä tarkoitetaan pituutta säteen suunnassa, jossa lasersäde on fokuksessa eli polttopiste on pienimmillään. Syvyysterävyysalue voi tarkoilla optiikoilla olla esimerkiksi 1-10 μm luokassa, mikä asettaa tiukat vaatimukset työstöprosessille.

Tyypillisiä työstökohteita näissä sovelluksissa ovat pyöreät tasomaiset kiekot, joiden halkaisijat vaihtelevat normaalisti 25 mm ja 300 mm välillä ja paksuudet 275 μm ja 775 μm välillä. Materiaalina on useimmiten pii, mutta myös muita materiaaleja käytetään. Ottaen huomioon laserin kapean syväterävyysalueen on suurienkin kiekkojen oltava hyvin tasomaisia. Myös ohuiden ja pinta-alaltaan suurien kiekkojen kiinnitys työstön ajaksi tarkasti oikeaan asentoon kiekon dimensioita vääristämättä on haasteellista. Kiekkojen tasomaisuusvaatimus määräytyykin monissa sovelluksissa valmistuksen vaatimuksien mukaan eikä tuotteelta vaadittavien ominaisuuksien mukaan.

Lasersäteen kohdistettavuuden kannalta työstöaseman liikuttelulaitteiston, kiinnityksen ja työstettävän kappaleen tarkkuusvaatimuksia voidaan lieventää kasvattamalla laserin syväterävyyttä. Lasersäteen syväterävyyden kasvattaminen johtaa toisaalta polttopisteen koon kasvamiseen, mikä on tarkoissa prosesseissa usein haitallista. Toinen vaihtoehto on mitata työstettävän kappaleen pinta ja muuttaa mittaustulosten perusteella polttopisteen paikkaa. Pinnanmittauksella voidaan mukautua työstettävien kappaleiden laadunvaihteluihin sekä väljentää laitteistolle ja kiinnitykselle asetettuja tarkkuusvaatimuksia. Tämä mahdollistaa laajemman prosessien ja materiaalien valikoiman. Haittapuolena on mittausaika ja koko järjestelmän ohjauksen monimutkaistuminen. Suuret tarkkuusvaatimukset yhdistettynä teollisissa prosesseissa vaadittaviin nopeuksiin asettavat myös korkeat vaatimukset mittaukselle sekä polttopisteen säädön nopeudelle.

Työkappaleen pinnanseurantaan perustuvaa korkeuden säätöä on tutkittu laserprosesseissa, jossa työkappaleen pinnan vaihtelut ovat useita millimetrejä tai jopa kymmeniä millimetrejä. Vaadittava laserin fokuksipisteen syvyys-suuntainen tarkkuus on satojen mikrometrin luokassa [1; 2]. Mikroskoopeissa on fokusointiin käytetty kameran kuvan

terävyyteen perustuvia menetelmiä [3; 4] sekä toiminnaltaan nopeampaa samalta optiselta akselilta tapahtuvaa mittausta, jossa ulkoinen valonlähde projisoidaan pintaan ja palaavaa sädettä analysoimalla päätellään onko optiikka oikealla korkeudella [5; 6]. Näissä metodeissa on kuitenkin haasteena riittävän nopeuden, tarkkuuden tai molempien saavuttaminen.

Tässä työssä esitetään reaaliaikaisen pinnan seurannan mukaan laserin polttopisteen paikkaa säättävä järjestelmä. Suunnittelun lähtökohtina on käytetty teollisuudessa ja tutkimuksessa esiin nousseita haasteita mikrotyöstöprosesseissa. Näissä prosesseissa laser säteen kohdistaminen oikealle korkeudelle on haastavaa johtuen tiukoista tarkkuusvaatimuksista yhdistettynä työkappaleiden pinnanvaihteluun ja korkeisiin liikenopeuksiin. Sovelluskohteissa on huomioitu prosessit, joissa työstettävä pinta on läpinäkyvä tai työstö suoritetaan läpinäkyvän kohteen sisään mitattavaan pintaan. Myös liittämissovellukset, joissa läpinäkyvän materiaalin läpi hitsataan kaksi kappaletta yhteen ja laser täytyy saada kohdistettua tarkasti materiaalien rajapintaan, on huomioitu. Järjestelmän tulee myös vastata tuotannossa vaadittaviin lyhyisiin työstöaikoihin. Mittaus ei saa aiheuttaa liiallista työstöaikojen pitenemistä ja polttopisteen säädön on oltava riittävän nopea suurillakin työstönopeuksilla.

2 LASERMIKROTYÖSTÖ, OPTINEN MITTAUS JA PIETSOSÄHKÖISET TOIMILAITTEET

Laserilla pystytään työstämään hyvin pieniä muotoja ja rakenteita. Työstöprosessin onnistuminen vaatii lasersäteen tarkan asemoinnin työkappaleeseen, minkä seurauksena vaaditaan tarkkoja mitta- ja liikuttelulaitteita. Optisilla mittalaitteilla saavutetaan hyvä tarkkuus ja pystytään mittaamaan erityyppisiä materiaaleja kosketuksettomasti. Piet-sosähköisissä toimilaitteissa yhdistyvät hyvä tarkkuus ja korkea nopeus, minkä vuoksi niitä käytetään yleisesti muun muassa optisten elementtien siirtämiseen.

2.1 Valo ja laser

Laservalo on yksiväristä, samanvaiheista ja yhdensuuntaista. Yksivärisyydelle eli monokromaattisuudella tarkoitetaan, että valo sisältää vain yhtä aallonpituutta. Valkoinen valo, johon esimerkiksi auringonvalo ja hehkulampun valo kuuluvat, sisältävät eri aallonpituuksia. Vaikka puhutaan väristä, niin lasereiden aallonpituusalue ulottuu selvästi näkyvän valon 400 - 700 nm ulkopuolelle ja käsittää noin 0,1 - 10,6 μm alueen. Samanvaiheisuudella tarkoitetaan, että kaikki valoaallos ovat samassa vaiheessa, jolloin lasersäteet vahvistavat toisiaan eli interferoivat. Yhdensuuntaisuudella tarkoitetaan puolestaan, että säde laajenee vain vähän matkan funktiona. [7; 8]

2.1.1 Laserin fokusointi

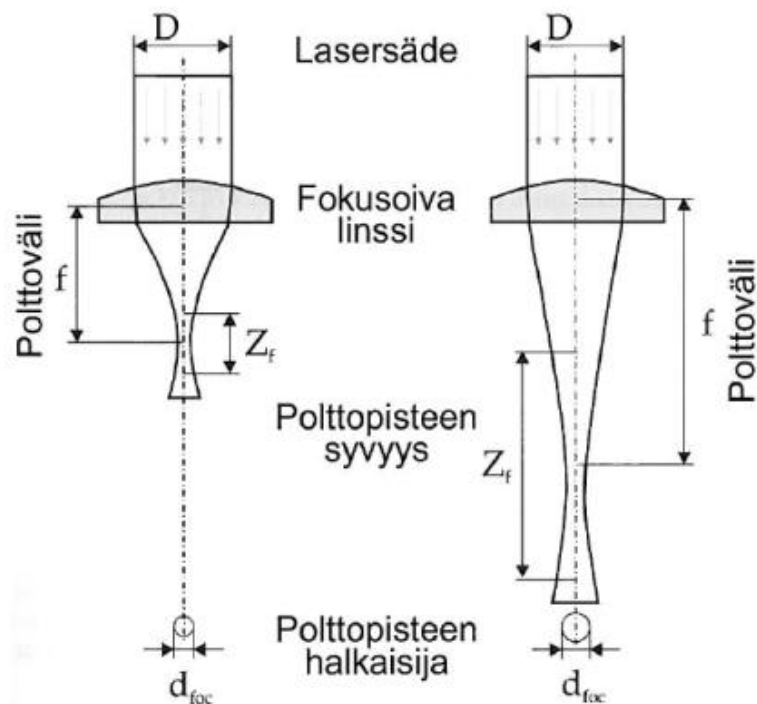
Työstettäessä laserilta lähtevä säteen halkaisija on yleensä liian suuri, että prosessin vaatima tehotiheys saavutettaisiin. Tästä syystä lasersäde fokusoidaan linssillä tai peileillä riittävän pieneksi prosessin vaatimuksien mukaan. Polttopisteen halkaisijaan D_{foc} vaikuttaa fokusoivan optiikan polttoväli f , laserin aallonpituus λ , raakasäteen halkaisija eli ennen fokusoivaa optiikkaa oleva säteen halkaisija D ja säteen laatu eli K-luku. Polttopiste saadaan laskettua kaavalla [7]

$$D_{\text{foc}} = \frac{4f\lambda}{D\pi K}, \quad (\text{kaava 1})$$

Ideaalisen säteen K-luku on yksi, mutta käytännössä K on aina pienempi kuin yksi ja polttopiste on myös siten ideaalista suurempi. Syväterävyyteen eli fokusoidun polttopisteen pituuteen säteen suunnassa vaikuttaa samat tekijät kuin polttopisteen halkaisijaan. Syväterävyys Z_f voidaan laskea kaavalla [7]

$$Z_f = \frac{4f^2\lambda}{D^2\pi K}. \quad (\text{kaava 2})$$

Kaavojen 1 ja 2 perusteella voidaan päätellä, että esimerkiksi polttovälin f kaksinkertaistuminen leventää polttopisteen halkaisijaa samassa suhteessa, mutta syvyysterävyys nelinkertaistuu. Ilmiötä on havainnollistettu kuvassa 2.1. Usein prosessin kannalta olisi hyödyllistä olla kapea polttopiste ja laaja syväterävyysalue. Koska samat tekijät vaikuttavat kumpaakin, joudutaan tekemään kompromisseja pitkän syväterävyysalueen ja kapean polttopisteen välillä. [7]

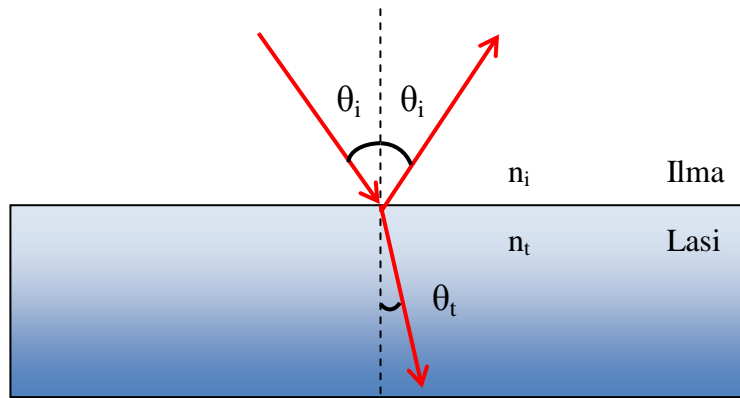


Kuva 2.1 Polttovälin vaikutus polttopisteen halkaisijaan ja syvyyteen [7].

Sovelluksissa, joissa polttopisteen pieni koko on kriittinen tekijä prosessin onnistumisen kannalta, joudutaan usein tyytymään lyhyeen syvyysterävyysalueeseen. Esimerkiksi lasermikrotyöstössä pyritään tyypillisesti kapeisiin polttopisteiden halkaisijoihin, jotta pienten ja tarkkojen muotojen valmistaminen olisi mahdollista. Tämän seurauksena laserin polttopisteen syvyys saattaa olla vain joitain mikrometrejä. [7; 9]

2.1.2 Valon taittuminen ja heijastuminen

Mitattaessa optisella anturilla läpinäkyvän materiaalin läpi tai työstettäessä laserilla materiaalia on tärkeää huomioida valon taittuminen ja heijastuminen. Valo taittuu optisen tiheyden muuttuessa harvemmasta tiheämpään kohti keskilinjaa kuvan 2.2 mukaisesti ja taittuu rajapinnasta samassa kulmassa kuin siihen tullessaan [10]. Vastaavasti valo taittuu keskilinjasta pois päin valon saapuessa optisesti tiheämmästä aineesta harvempaan.



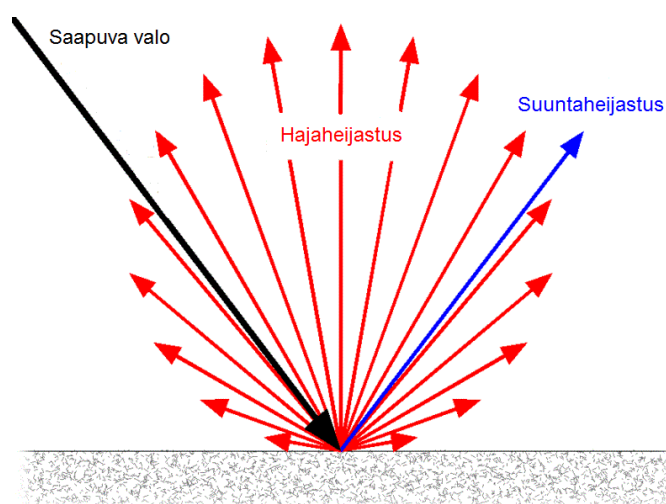
Kuva 2.2 Valon heijastuminen ja taittuminen [muokattu lähteestä 10].

Valon taittumisen voimakkuus on Snellin lain mukaisesti riippuvainen tulokulmasta aineiden rajapintaan sekä taitekertoimien suhteesta. Kulmien ja taitekertoimien välinen suhde voidaan esittää seuraavasti

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (\text{kaava 3})$$

jossa n_i ja n_t ovat materiaalien taitekertoimet ja kulmat θ_i ja θ_t kertovat missä kulmassa keskilinjaan nähden valo lähtee tai saapuu rajapintaan [10].

Valon osuessa kohteen pintaan osa heijastuu samassa kulmassa kohteesta poispäin, kuten aikaisemmin todettiin, mutta osa valosta hajaheijastuu kuvan 2.3 mukaisesti. Peilipintaissa tai läpinäkyvissä kappaleissa hajaheijastuneen valon osuus on tyypillisesti alhainen ja rosoisilla pinnoilla suuri. [10; 11] Hajaheijastuminen on tärkeää esimerkiksi kolmiomittauksessa, jos lähetetty valo ei heijastu takaisin suoraan takaisin anturin dektektorille, vaan käytetään hyväksi hajaheijastunutta valoa paikan määrittämiseen.



Kuva 2.3 Saapuvan valon osuessa kohteen pintaan on seurauksena haja- ja suuntaheijastus [muokattu lähteestä 11].

Valon käyttäytyminen osuessa materiaaliin on tärkeää laserin työstettävyyden ja optisten mittalaitteiden kannalta. Työstettäessä lasersäteen absorptio eli tehon siirtyminen säteestä materiaaliin on hyvin tärkeää, kun optisten mittalaitteiden kannalta valon heijastuminen ja taittuminen ovat tärkeitä. Valon käyttäytymiseen vaikuttaa voimakkaasti aallonpituus ja esimerkiksi useimmat näkyvälle aallonpituudelle läpinäkyvät muovit ja lasit absorboituvat voimakkaasti CO₂-laserin käyttämällä 10,6 µm aallonpituudella [7].

Optisilla antureilla lähetetään usein kohteeseen valoa ja käytetään hyväksi siitä takaisin heijastunutta valoa. Esimerkiksi interferometri-, kolmio- ja konfokaalimittaus perustuvat kaikki takaisin heijastuneeseen valoon [12; 13; 14]. Korkea absorptio tai valon läpisy saattavat aiheuttaa ongelmia joihinkin optisiin mittauksiin, mikäli kohteesta ei heijastu riittävästi valoa mittalaitteelle. Jos mittaus tapahtuu läpinäkyvän kohteen läpi, täytyy valon mahdollinen taittuminen rajapinnassa huomioida mittaustuloksissa.

2.2 Lasermikrotyöstö

Laserteknologialle tyypilliset piirteet kuten säteen hyvä fokusoitavuus, alhainen lämmöntuotto ja laaja työstettävien materiaalien kirjo sopivat hyvin mikrotyöstösovelluksiin. Lasersäde voidaan fokusoida vain muutaman mikrometrin tai jossain tapauksissa jopa alle mikrometrin halkaisijaltaan olevaan fokuksipisteeseen, mikä mahdollistaa pienten muotojen työstön. Lasertyöstössä lämpövaikutusalue, roiskeet ja sulamateriaali jäävät vähäisiksi etenkin käytettäessä lyhyitä pulssinpituuksia. Perinteiseen mikrotyöstömenetelmään etsaukseen verrattuna laserilla on etuna soveltuvuus myös ei piipohjaisille materiaaleille. Lasermikrotyöstöä käytetään esimerkiksi leikkauksessa, porauksessa, hitsauksessa, juottamisessa ja pinnan strukturoinnissa. [15; 16]

Lasermikrotyöstölaitteisto koostuu yleensä laserlähteestä, liikuttelulaitteistosta työkalupaleen asemointia varten, mikroskooppikamerasta työstöjäljen seurantaan ja työkalupaleen paikannusta varten sekä tietokoneesta lasersäteen ja työkalupaleen asemoinnin synkronointia varten [9]. Mikrotyöstölle yleisesti on olemassa monia määritelmiä, kuten tuotteet tai piirteet, joiden dimensiot ovat vähintään kahdessa dimensiossa alle millimetrituokassa [15] tai dimensiot ovat 0,1 µm ja 100 µm välillä. [17].

Pulssilasereilla saavutetaan korkeammat huipputehot pulssin aikana, kun vastaavilla jatkuvatoimisilla lasereilla, vaikka keskimääräinen teho pulssilasereilla jääkin alhaisemmaksi. Pulssin pituus on mikrotyöstössä tärkeä sillä kohteeseen tuotu energia johtuu ympäröivään materiaaliin. Lämmönjohtumisaika ympäristöön on materiaalikohtainen. Käytettäessä erittäin lyhyitä, alle 10 ps yleensä femtosekuntiluokan (femto = 10⁻¹⁵) pulssinpituuksia, saavutetaan hyvin tarkka työstöjälki. Lämpöenergialla ei ole erittäin lyhyillä pulssinpituuksilla aikaa johtua ympäröivään materiaaliin vaan se poistuu plasmana kohteesta. Tällöin ei synny lämpövaikutusaluetta tai roiskeita kappaleen pinnalle. [15; 9]

Aallonpituudella on myös tärkeä vaikutus työstöprosessiin. Mitä pienempi aallonpituus, sitä kapeammaksi voidaan lasersäde fokusoida. Lasersäteen absorboituminen materiaaliin on myös voimakkaasti riippuvainen aallonpituudesta. Tiedetyt prosessit ja materiaalit edellyttävät tiettyä aallonpituutta, jotta absorptio saadaan kohotettua prosessin edellyttämälle tasolle. Mikrotyöstössä usein käytettyjä lasertyyppisiä ovat kiinteänohimuodon laserit kuten Nd:YAG laserit 1064 nm aallonpituudella, kuitulaserit sekä Excimer laserit, joille tyypillisimpiä aallonpituuksia ovat laseroivasta väliaineesta riippuen 193 nm, 248 nm tai 308nm. [7; 9]

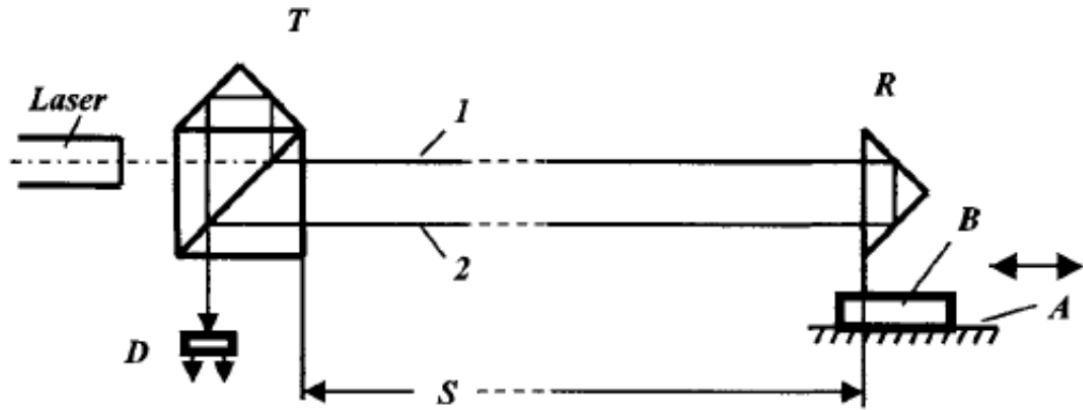
2.3 Optinen mittaus

Koskettavat profiilimittaukset tehdään yleisesti käyttäen terävää mittauskärkeä, joka on mekaanisesti kosketuksissa pintaan. Muutokset pinnassa aiheuttavat mitattavissa olevan liikkeen mittauskärjessä. Optisen mittauksen etuna verrattuna koskettavaan mittaukseen on fyysisen kontaktin puuttuminen, jolloin mitattavan kappaleen pintaan ei ole mahdollista aiheuttaa vaurioita. Tämä mahdollistaa myös pehmeiden materiaalien mittaamisen ja mitta-anturi ei altistu kulumiselle. [13]

2.3.1 Interferometria

Kahden valoallon ollessa päällekkäin on syntyvän valon intensiteetti riippuvainen siitä vahvistavatko vai heikentävätkö ne toisiaan. Samassa vaiheessa olevat aallot vahvistavat toisiaan ja eri vaiheiset aallot kumoavat toisensa. Tämä ilmiö tunnetaan interferenssinä. Ilmiötä voidaan hyödyntää siirtymän mittaamisessa, jossa mitattavasta kohteesta heijastunut valo ja referenssi valo interferoivat keskenään. [12; 13]

Kuvassa 2.4 on esitetty tyypillinen laserinterferometrin rakenne, jossa valon lähteenä toimiva laser tuottaa koherenttia valoa eli kaikki valoallot ovat saman vaiheisia, samansuuntaisia ja samaa aallonpituutta. Laserilta lähtevä säde osuu ensimmäisenä interferometriin T, joka jakaa säteen kahteen osaan: yksi säteistä heijastuu 90° kulmassa paikallaan olevalle referenssipeilille ja siitä edelleen ilmaisimelle D ja toinen säteistä jatkaa matkaa peilille R. Peili R liikkuu mitattavan kohteen B mukana tasoa A pitkin. Peililtä R palaava säde heijastuu myös ilmaisimelle, jossa se interferoi referenssipeililtä tulevan säteen kanssa. Kun kappaletta B liikutetaan, muuttuu myös säteen kulkema matka ja samalla detektorille tulevien säteiden vaiheiden keskinäinen suhde. Keskinäinen suhde näkyy ilmaisimella sinimuotoisena kirkkauden vaihteluna eli kirkkaana, kun säteet ovat samassa vaiheessa ja tummana säteiden ollessa vastakkaisessa vaiheessa. Liike pystytään havaitsemaan seuraamalla intensiteetin vaihteluita ilmaisimella. [12]



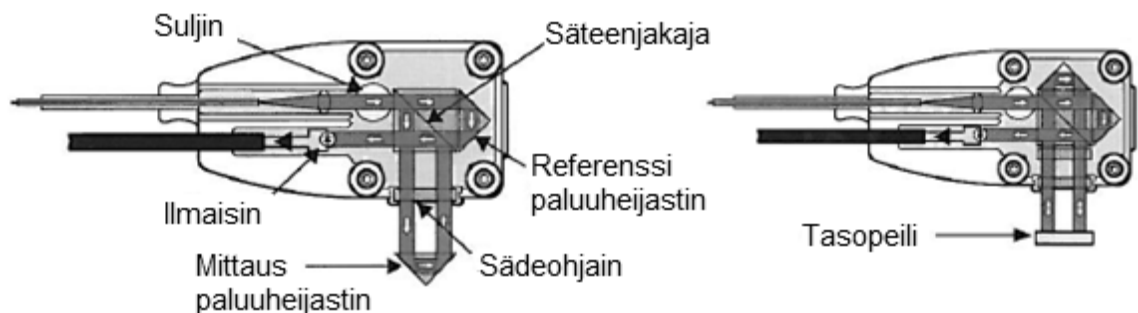
Kuva 2.4 Siirtymän mittaus laserinterferometrillä [12].

Lasersäde kulkee kappaleen siirtyneen matkan kahteen kertaan eli kohteeseen ja takaisin, jolloin mitattu matka S on suhteessa intensiteettisyklien määrään jaettuna kahdella sekä aallonpituuteen. Intensiteettisykli käsittää muuttumisen valoisasta tummaan ja takaisin. Esimerkiksi tyypillisesti interferometreissa käytössä oleva 633 nm aallonpituuksisen laserin yksi sykli olisi tällöin 316,5 nm. Kokonaissiirtymä saadaan laskettua kaavalla

$$S = \frac{\lambda}{2} N, \quad (\text{kaava 4})$$

jossa S on siirtymä, λ on valon aallonpituus ja N on syklien määrä. [12]

Interferometrille on kehitetty onnistuneesti monenlaisia konfiguraatioita, jotka poikkeavat hieman yllä esitetystä, mutta sama valon interferenssiin perustuva mittausperiaate pätee myös niihin. Kuvassa 2.5 on esitetty Renishaw:n valmistamien kahden interferometrin säteen kulku, joista vasemman puoleinen käyttää yllä esitettyä konfiguraatiota ja ja oikeanpuoleinen tasopeili-interferometriä. [18]



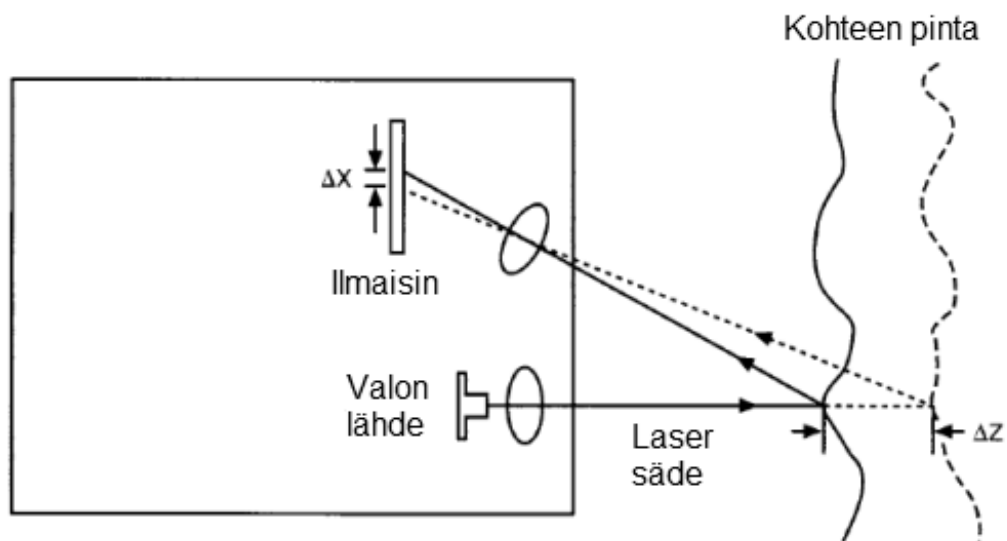
Kuva 2.5 Vasemmalla kulmapeiliä ja oikealla tasopeiliä käyttävät interferometrit [muokattu lähteestä 18].

Kuvan 2.5 interferometreissä laservalo tuodaan valokuitua pitkin mittauspäähän, josta se heijastetaan mittauskohteeseen olevaan peiliin. Tasopeiliä käyttävän interferometrin

säteenkulku on muuten samanlainen kuin kulmapeiliä käytettäessä, mutta erona on, että mittaushetkellä kulkevan säteen matka kaksinkertaistuu. Tämä kaksinkertaistaa myös laitteistolla saavutettavan resoluution. [18]

2.3.2 Kolmiomittaus

Kolmiomittauksen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 2.6. Laserdiodi toimii valonlähteenä, jonka tuottama lasersäde heijastuu kohteen pinnasta ja palaa fokusoivan linssin läpi paikkaherkälle ilmaisimelle. Pinnan muuttuessa etäisyyden Δz verran, muuttuu myös detektorille kuvastuneen pisteen sijainti suhteessa pintaan matkan Δx verran. [13]



Kuva 2.6 Kolmiomittaukseen perustuvan anturin toimintaperiaate [13].

Pinnan siirtymä voidaan laskea kaavalla [13]

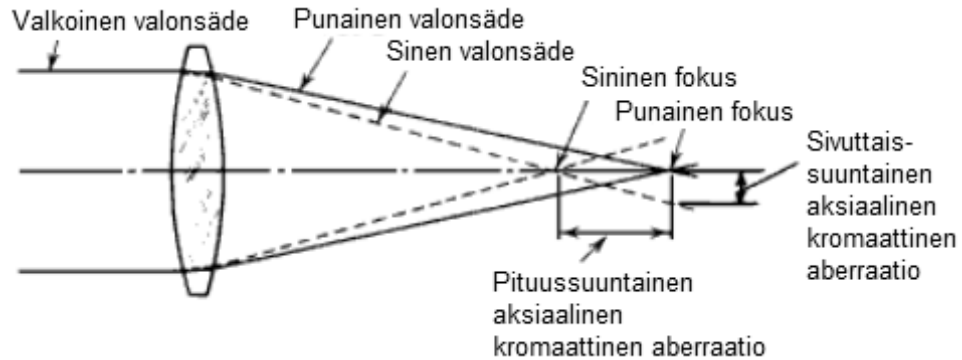
$$\Delta z = \frac{\Delta x \sin \phi}{m \sin \theta}, \quad (\text{kaava 5})$$

jossa m on linssin suurennos, ϕ on kulma ilmaisimen tason ja siihen osuvan valon välillä ja θ on kulma anturilta lähtevän valon ja kohteesta heijastuvan valon välillä. Valolle vaaditaan esteetön tie kohteen pinnasta ilmaisimelle. Syvien urien ja kuoppien tapauksessa jyrkät reunat saattavat estää valon pääsyn takaisin anturille johtuen kulmasta laser säteen reitillä valonlähteestä ilmaisimelle [14].

2.3.3 Konfokaalimittaus

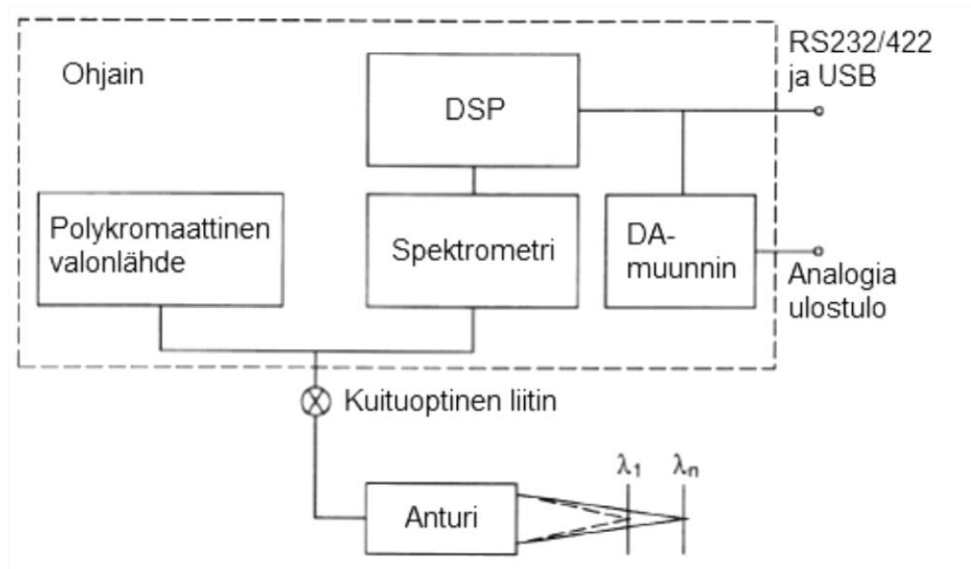
Konfokaalimittauksessa anturilta lähtevä polykromaattinen eli monivärinen valkoinen valo fokusoidaan optiikalla mitattavan kohteen pintaan. Linssit optiikassa ovat järjestetty niin, että valkoinen valo hajaantuu yksiväriseksi valoksi hallitun kromaattisen aberration avulla. Kromaattisella aberratiolla tarkoitetaan aallonpituudesta riippuvaa tait-

tumista linssissä. Kuvassa 2.7 näkyy, miten useista aallonpituuksista koostuvan valkoi-
sen valon eri aallonpituudet fokusoituvat eri etäisyyksille. Kohteen pintaan osuva valo
heijastuu takaisin anturille, josta se kulkeutuu aukon läpi spektrometrille. Aukon läpi
pääsee vain tarkasti fokuksessa olevat säteet ja vastaanotin tulkitsee muutokset spektris-
sä eli läpi päässeän säteen aallonpituuden. [14; 19; 20]



Kuva 2.7 Kromaattisen aberraation vaikutus eri aallonpituuksisten valonsäteiden tait-
tumiseen [muokattu lähteestä 20].

Kuvassa 2.8 näkyy esimerkki konfokaalianturin rakenteesta. Valonlähteestä kuljetetaan
kuitua pitkin valkoinen valo anturille, jossa aallonpituudet fokusoidaan eri etäisyyksille.
Palaava valo kulkee samaa kuitua pitkin takaisin ja ohjataan spektrometrille, joka tun-
nistaa aallonpituuden ja laskee sen perusteella kohteen etäisyyden anturista. Mittaustu-
los tuodaan ulos joko digitaalisessa tai analogisessa muodossa. [19]



Kuva 2.8 Konfokaalianturin rakenne [muokattu lähteestä 19].

Konfokaalimittaus soveltuu sekä diffuusoiville että heijastaville pinnoille. Läpinäkyvien
materiaalien läpi on myös mahdollista mitata, jolloin yhdellä anturilla saadaan selville

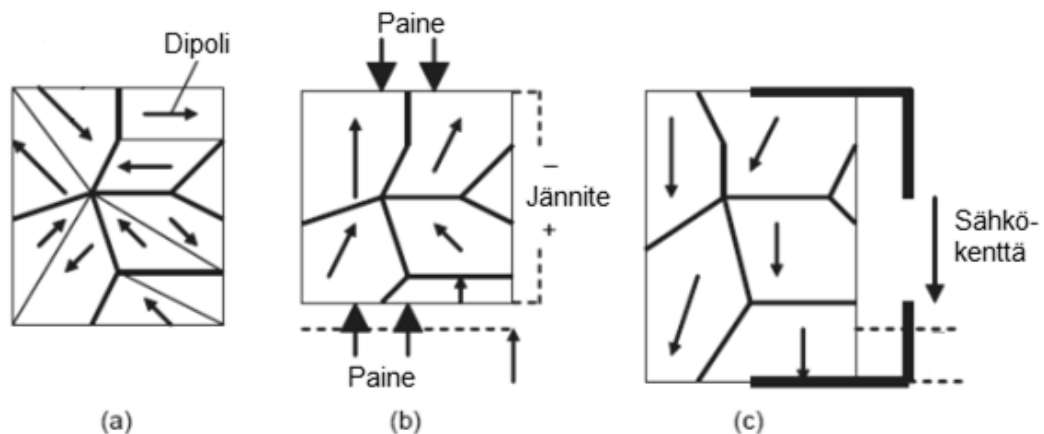
materiaalin ylä- ja alapinta ja voidaan siten laskea materiaalin paksuus. Anturilta tuleva ja palaava valo kulkevat samaa optista akselia pitkin, mikä mahdollistaa myös jyrkkäreunaisten ja syvien pinnanmuotojen mittaamisen. Valosäteen halkaisija on tyypillisesti $5\ \mu\text{m} - 100\ \mu\text{m}$ riippuen mitta-alueesta. Kapea halkaisija mahdollistaa pinnan profiilin mittaamisen anturilla, joka on yhdistetty liikuttelulaitteistoon. Kaltevat pinnat saattavat aiheuttaa häiriötä mittaukseen tai estää mittaamisen kokonaan. [14; 19]

2.4 Pietsosähköiset toimilaitteet

Pietsosähköisiä toimilaitteita käytetään laajasti erityyppisiin sovelluskohteisiin kuten lineaarisen liikkeen toteutukseen, moottoreihin ja liikuteltaviin tasoihin. Pietsosähköisiä elementtejä voidaan käyttää myös antureina mittaamaan esimerkiksi kiihtyvyyttä, virtausta tai siirtymää. Pietsosähköiset toimilaitteet ovat erittäin tarkkoja ja niillä voidaan saavuttaa jopa nanometriluokan paikoitustarkkuus. Liikematkat pietsosähköisillä toimilaitteilla ovat tyypillisesti joitain kymmeniä tai satoja mikrometrejä. Liikematkaa voidaan kasvattaa mekaanisilla vipuvarsilla jopa millimetreihin ja pietsomoottoroiduissa tasoissa liikematkat voivat olla kymmeniä millimetrejä. [21; 22; 23]

2.4.1 Toimintaperiaate

Pietsosähköiset materiaalit polarisoituvat eli niihin muodostuu varaus mekaanisen rasituksen voimasta. Veto ja puristus muodostavat vastakkaissuuntaisen polarisaation suhteessa kohdistuvaan voimaan. Ilmiö toimii myös käänteisesti eli sähkökentän vaikuttaessa pietsosähköiseen materiaaliin kappale lyhenee tai pitenee riippuen sähkökentän polarisaatiosta. Sähkökentän voimakkuus vaikuttaa siirtymän suuruuteen. Pietsosähköisen materiaalin käyttäytyminen on esitetty kuvassa 2.9. [21]



Kuva 2.9 Pietsosähköisen materiaalin käyttäytyminen: a) polarisoitumaton tila, kun voimaa tai sähkökenttää ei ole kohdistettu materiaaliin, b) polarisoitu tila, kun materiaaliin kohdistuu puristusvoima ja c) polarisoitu tila, kun sähkökenttä vaikuttaa materiaaliin. Materiaalit b) ja c) kohdassa ovat poolattuja, jolloin polarisaatio suunta on lähes yhdenmukainen kaikissa dipoleissa [muokattu lähteestä 21].

Teollisissa sovelluksissa usein käytettyjä materiaaleja ovat eritavoin seostetut lyijyzirkonaatit (PbZrO_3), luonnossa esiintyvät kvartsi (SiO_2) ja bariumtitanaatti (BaTiO_3) [22]. Pietsosähköiset materiaalit kuuluvat ferrosähköisiin materiaaleihin ja ne ovat pysyvästi polarisoituneita. Polarisaation suuntaa esitetään nuolilla materiaalin sisässä kuvassa 2.9. Dipolit ovat normaalisti suuntautuneet materiaalissa satunnaisesti, minkä vuoksi pietsosähköinen ilmiö ei ole makrotasolla havaittavissa ilman materiaalin poolausta. Ferrosähköisen luonteen vuoksi pietsomateriaalien dipolien polarisaatiosuunta on mahdollista pakottaa pysyvästi tietyn suuntaiseksi voimakkaan sähkökentän avulla. Jotkin pietsomateriaalit vaativat myös korkeiden lämpötilojen käyttöä poolausprosessin aikana. Materiaalin altistaminen liian suurelle lämpötilalle, sähkökentälle tai mekaaniselle rasitukselle heikentää materiaalin pietsosähköisiä ominaisuuksia. [21; 23]

2.4.2 Toimilaitteet

Pietsosähköiseen ilmiöön perustuvia toimilaitteita on laaja kirjo, joissa hyödynnetään pietsosähköisen materiaalin taipumista, laajenemista tai supistumista sähkökentän vaikutuksesta. Näitä ominaisuuksia hyödyntäen voidaan toteuttaa esimerkiksi pyörimismoottori tai lineaarinen liike. [23] Tässä osiossa keskitytään työn kannalta olennaisiin yhteen suuntaan lineaarisen liikkeen toteuttaviin toimilaitteisiin.

Pinotyypisissä toimilaitteissa on päällekkäin useita pietsosähköisiä keraamilevyjä, jotka on erotettu ohuilla metallisilla elektrodeilla. Yhdellä levyllä voidaan saavuttaa vain noin 0,2 % siirtymä suhteessa levyn paksuuteen, mutta pinoamalla useita levyjä päällekkäin saadaan matkaa kasvatettua. Suurin käytettävä jännite on myös suhteellinen levyjen paksuuteen. Levyjen paksuus vaihtelee tyypillisesti 0,4 mm ja 1 mm välillä. Pinotyypiset elementit kestävät eri pietsotoimilaitteista parhaiten korkeaa painetta ja ovat rakenteeltaan jäykimpiä. Pinotyypisellä toimilaitteella saavutettavaa siirtymää voidaan karkeasti arvioida seuraavalla kaavalla, jossa ΔL on siirtymä, d_{33} venymä kerroin (sähkökenttä ja siirtymä polarisaation suuntaisesti), n keraamisten levyjen määrä ja U käyttöjännite [23]

$$\Delta L \approx d_{33} n U. \quad (\text{kaava 6})$$

Laminaariseen suunnitteluun pohjautuvat toimilaitteet omaavat negatiivisen venymäkerroimen ja niihin kohdistettu jännite aiheuttaa keraamisen liuskan kutistumisen. Suurin saavutettava liikematka on riippuvainen liuskan pituudesta ja rinnakkain asetettujen liuskojen määrä määrittää rakenteen jäykkyyden ja voiman tuoton. Laminaarisella toimilaitteella saavutettu siirtymä voidaan arvioida seuraavasti

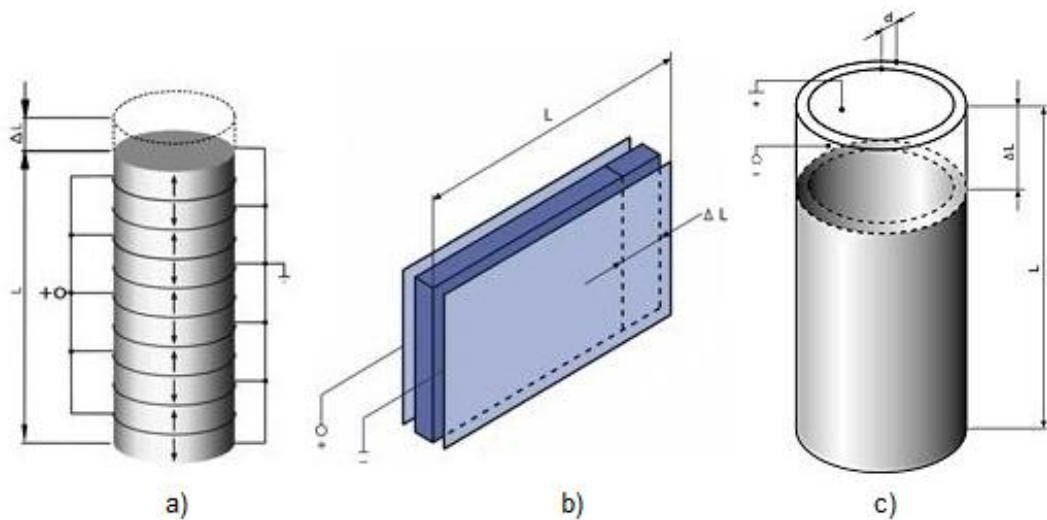
$$\Delta L \approx d_{31} L \frac{U}{d}, \quad (\text{kaava 7})$$

jossa d_{31} on venymä kerroin (sähkökenttä ja siirtymä polarisaatioon kohtisuorassa), L liuskan pituus ja d yhden liuskan paksuus. [23]

Putkimaisilla toimilaitteilla jännite aiheuttaa myös pietsosähköisen materiaalin kutistumisen kuten laminaarisillakin toimilaitteilla, mutta putkimaisilla toimilaitteilla kutistumista tapahtuu myös säteen suuntaisesti. Putket päällystetään sisä- ja ulkopinnalta johdettavalla materiaalilla, jota kautta jännite tuodaan pietsosähköiseen materiaaliin. Jakamalla ulompi pinta pituussuuntaisesti useampaan osaan saadaan putkea myös taivutettua käyttämällä eri osissa eri jännitettä. Siirtymää voidaan arvioida kaavan 7 avulla pituussuunnassa ja säteensuuntaisesti kaavalla 8, jossa Δr on siirtymä, r putken säde ja d seinämän paksuus [23]

$$\frac{\Delta r}{r} \approx d_{31} \frac{U}{d}. \quad (\text{kaava 8})$$

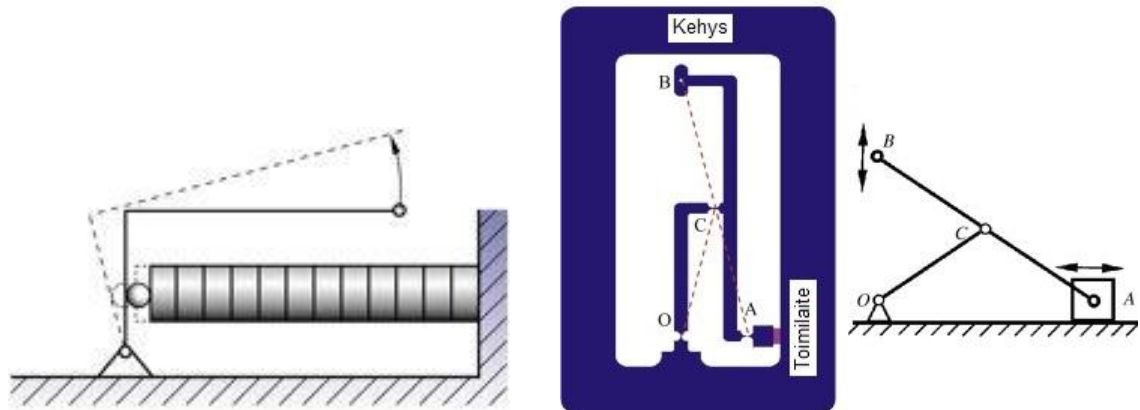
Kuvassa 2.10 on esitetty kaikki kolme toimilaitetyyppiä. Kuvaan on merkitty pituussuuntaiset siirtymät ΔL suhteessa pituuteen L sekä jännitteiden suunnat.



Kuva 2.10 Pietsotoimilaitteet: a) pino, b) laminaarinen, c) putki [muokattu lähteestä 23].

Pietsosähköiset toimilaitteet voidaan suunnitella myös siten, että liikealuetta voidaan kasvattaa vipuliikkeellä. Hyvin korkean resoluution säilyttämiseksi täytyy vipujärjestelmien olla erittäin jäykkiä, välyksettömiä ja kitkattomia, minkä vuoksi esimerkiksi kuula- tai rullalaakereita ei voida käyttää. Yhdistäväksi elementiksi sopii hyvin mekaanisen taipumisen kautta liikkeen mahdollistavat rakenteet. Kuvassa 2.11 on esitettyä vasemmalla yksinkertaistettu periaatekuva, jossa toimilaitteen tuottama lyhyt x-suuntainen siirtymä vahvistetaan vipuliikkeen avulla suuremmaksi y-suuntaiseksi siirtymäksi. Oikealla on kohdassa esitetty Scott-Russell -mekanismiin pohjautuva fyysinen rakenne, jossa nivelet A, C ja O ovat minimi paksuudeltaan 1,5 mm muun rakenteen

ollessa 10 mm paksua alumiiniseosta. Pietsotoimilaite liikuttaa niveltä A-kohdassa x-suuntaan, jolla saadaan aikaiseksi B-pisteen siirtymä y-suunnassa. [23; 24]



Kuva 2.11 Vasemmalla yksinkertainen periaatekuva vipumekanismin hyödyntämisestä pietsotoimilaitteessa [10] ja oikealla Scott-Russell -mekanismin pohjautuva toimilaite [muokattu lähteestä 24].

Pietsosähköisten toimilaitteiden, joihin on sisäänrakennettu liikkeen vahvistin esimerkiksi vipumekanismeilla, etuina voidaan pitää suurempaa liikealuetta ja pienempää kokoa verrattuna pinotyyppeihin pietsotoimilaitteisiin. Myös kapasitanssi on pienempi jolloin voidaan käyttää alemmaa virtaa. Huonona puolena on alempi resonanssitaajuus ja jäykkyys. [23; 24]

2.4.3 Dynaaminen toiminta

Pietsoelementille tuodun jännitteen vaihtuessa muuttuvat myös elementin dimensiot. Pietsotoimilaitteen massa sekä mahdollisen kuorman massa aiheuttavat muutoksen aikana voiman joka vetää tai työntää pietsoa. Suurin tuotettava voima voidaan arvioida kaavan 9 perusteella, jossa F_{\max} on tuotettu voima, k_t toimilaitteen jäykkyys ja ΔL_0 suurin nimellissiirtymä ilman ulkoista voimaa tai puristusta. [23]

$$F_{\max} \approx \pm k_t \Delta L_0 \quad (\text{kaava 9})$$

Toimilaitteeseen kohdistuvat vetävät voimat täytyy kompensoida esimerkiksi jousien avulla tuotetulla esikuormituksella. Esikuormituksen jäykkyyden tulisi olla pieni verrattuna pietsotoimilaitteeseen eikä ylittää 10 % toimilaitteen jäykkyydestä. [23]

Toimilaitteeseen kohdistuvat dynaamiset voimat siniaaltomaisessa liikkeessä voidaan laskea kaavalla 10, jossa F_{dyn} on toimilaitteeseen kohdistuva voima, m_{eff} on vaikuttava massa (noin kolmasosa keraamisen pinon massasta sekä toimilaitteen päähän kiinnitetty kuorma), ΔL on huipusta huippuun siirtymä ja f taajuus. [23]

$$F_{dyn} = \pm \pi^2 m_{eff} \left(\frac{\Delta L}{2} \right) f^2 \quad (\text{kaava 10})$$

Toimilaitteen rakenne määrittää suurimmat sallitut voimat ja niiden ylittäminen saattaa vaurioittaa toimilaitetta. Toimilaitteen liikesuunnasta poikkeavat voimat, kuten kallistukset, vääntö tai sivuttaissuuntaiset voimat, ovat haitallisia ja niiden välttämiseksi kiinnitys ja kuormasta syntyvien voimien ohjaus täytyy suunnitella huolella. [23]

Pietsosähköisen toimilaitteen käyttäytymistä voidaan kuvata jousimassasysteemin avulla, missä ideaalinen resonanssitaajuus f_0 on riippuvainen jäykkyydestä k_T ja vaikuttavasta massasta m_{eff} . Resonanssitaajuuden ylittävien taajuuksien käyttö aiheuttaa toimilaitteen epävakaan toiminnan. [23]

$$f_0 = \left(\frac{1}{2\pi} \right) \sqrt{\frac{k_T}{m_{eff}}} \quad (\text{kaava 11})$$

Pietsotoimilaitteille on tyypillistä nopea vaste, jossa nopea jännitteen muutos tuottaa nopea paikan muutoksen. Pietsotoimilaite voi saavuttaa nimellisen siirtymän arviolta 1/3 resonanssitaajuuden jaksonajasta edellyttäen, että ohjain pystyy tuottamaan riittävän suuren virran. Pienin nousuaika voidaan laskea kaavalla 12, jossa T_{min} on minimi nousuaika ja f_0 resonanssitaajuus.

$$T_{min} \approx \frac{1}{3f_0} \quad (\text{kaava 12})$$

Jos nopeaa siirtymää ei kompensoida ohjaimen servosilmukassa, on seurauksena huomattava tavoitearvon ylitys. [23]

3 LAITTEET JA OHJELMAT

Lasersäteen fokuksipisteen säätöön valittavan toimilaitteen täytyy pystyä seuraamaan tarkasti työkappaleen pintaa. Pinnan profiilin mittaamiseen käytettävän anturin valinnassa täytyy huomioida eri työkappaleiden materiaalien ja rakenteen ominaisuudet. Tavoitteena on vastata teollisen tuotannon korkeisiin liikenopeuksiin ja suuriin työkappale koihin.

Järjestelmän komponenttien ja toimintaperiaatteen testausta varten rakennettiin ensimmäinen testilaitteisto, jolla voitiin kokeilla kahden erityyppisen anturin soveltuvuutta ja kartoittaa laitteilta vaadittavia suoritusarvoja. Ensimmäisten testien perusteella rakennettiin prototyyppi, jolla pystyttiin arvioimaan korkeuden seurannan toimivuutta käytännössä järjestelmän ollessa kytkettynä lasertyöstöasemaan. Laitteiston mitta-anturien parametrien asettamiseen ja testaukseen käytettiin anturivalmistajien omia ohjelmistoja. Anturien mittatuloksien lukemiseen ja toimilaitteen ohjauksen kontrolloimisessa käytettiin apuna National Instrumentsin Labview-ohjelmaa.

3.1 Toimilaitteen ja mittaustavan valinta

Valinnassa on keskitytty yleisesti teollisessa tuotannossa käytettyihin toimilaitteisiin ja mitta-antureihin, joiden tarkkuus, suoritusarvot ja mitta- tai liikealueet ovat sovellukseen riittäviä. Ratkaisuja arvioitaessa on kiinnitetty huomiota joustavuuteen erilaisia työstöprosesseja varten ja saavutettavaan prosessointiaikaan.

3.1.1 Toimilaitteen valinta

Fokuspisteen paikkaa säätävän toimilaitteen valinnassa on huomioitava vaadittu tarkkuus, joka voi tarkimmissa sovelluksissa olla yhden mikrometrin luokassa. Lisäksi on huomioitava suuri, jopa yli 1000 mm/s ylittävä, liikenopeus, mikä asettaa tiukat vaatimukset toimilaitteiden reaktio- ja liikenopeuksiin. Liikealueen ei tarvitse olla laaja, sillä tyypillisissä sovelluksissa pinnan vaihteluiden arvioitiin pysyvän $\pm 100 \mu\text{m}$ sisässä. Toimilaitteen ohjauksessa on huomioitava erityisesti integrointi muihin järjestelmiin, koska yksi tärkeistä tavoitteista on pinnanseurantajärjestelmän yhteensopivuus olemassa oleviin lasertyöstölaitteistoihin. Mahdollisimman itsenäisesti toimiva pinnanseurantajärjestelmä yksinkertaisella rajapinnalla on integroinnin kannalta hyvä.

Valmiissa lasertyöstöasemissa on useimmiten mahdollisuus muuttaa pystysuuntaista korkeutta z-akselilla, jolloin lasersäde saadaan kohdistettua oikeaan kohtaan. Z-akselin

liikkeessä tyypillisesti käytettyjä ratkaisuja ovat kuularuuvivälityksen ja sähkömoottorin avulla tai lineaarimoottorilla toteutettu liike. Mikrotyöstöön soveltuvissa työstöasemissa liikkeen tarkkuus ja saavutettava maksimi liikenoisuus ovat yleensä riittävällä tasolla pinnanseuranta varten. Ongelmaksi muodostuu kuitenkin helposti z-akselin kiihtyvyys ja reagointinopeus. Pinnan seuraaminen vaatii suuria kiihtyvyyksiä ja mahdollisuutta vaihtaa nopeasti suuntaa säilyttäen kuitenkin koko ajan tarkasti paikan. Tämän saavuttaminen on haastavaa perinteisillä liikkeentuottomenetelmillä ja suhteellisen suurilla massoilla. Akselille kuormaa aiheuttavat lasertyöstöpää tai mahdollisesti pelkkä foku-soiva optiikka, jos laser sijaitsee muualla. Lisäksi akselin kannateltavaksi tulevat vielä toimilaitteen rakenteista, mittalaitteista ja kiinnittimistä aiheutuva massa. Akselin ohjauksen kannalta samaan aikaan liikkeen kanssa suoritettava mittaustapa on myös haaste, koska liikerata ei ole tiedossa etukäteen vaan muodostuu liikkeen aikana.

Toimilaitteen nopean toiminnan ja kiihtyvyyksien kannalta on hyödyllistä minimoida liikuteltava massa. Lasertyöstöpäiden massat ovat usein suuria, joten koko työstöpään sijaan kannattaa liikuttaa vain lasersäteen foku-soinnin suorittavaa komponenttia eli kohdistavaa optiikkaa. Optiikan painoa arvioitaessa on otettava huomioon lasermikrotyöstössä käytettävät linssijärjestelmät, joiden paino voi olla satoja grammoja.

Optiikan liikuttamista varten parhaimmaksi vaihtoehtoksi arvioitiin pietsosähköinen toimilaite, jonka vahvuudet sopivat hyvin yhteen asetettujen vaatimuksien kanssa. Pietsosähköiset toimilaitteet reagoivat nopeasti ohjauksen muutokseen ja pystyvät saavuttamaan hyvin suuren kiihtyvyyden. Paikoitustarkkuus pietsotoimilaitteissa on normaalisti selvästi parempi kuin vaadittava noin 1 μm tarkkuus. Pietsotoimilaitteiden kapea liikealue ei ole ongelma, koska pinnan vaihtelut ovat pieniä. Pelkästään pietsotoimilaite ei kuitenkaan ole riittävä z-liikkeen toteutukseen, jos laitteistolla työstetään kappaleita joiden paksuudet vaihtelevat paljon tai kiinnitystapa aiheuttaa suuria korkeusvaihteluja. Pietsotoimilaitetta voidaan tällöin käyttää rinnakkain esimerkiksi lineaarimoottorin kanssa, jolloin lineaarimoottorilla siirrytään pitkät liikematkat ennen työstöä ja työstön aikana pietsotoimilaite suorittaa pinnanseurantaan vaadittavat nopeat ja tarkat liikkeet.

3.1.2 Mittaustavan valinta ja toimilaitteen ohjaus

Mittaustavan ja -tekniikan valinnassa on huomioitava riittävän tarkkuuden lisäksi työstettävien materiaalien laaja kirjo. Materiaalina voi olla esimerkiksi metallia, keraamia, lasia tai piitä ja työkappaleet voivat olla matta- tai peilipintaisia. Työstöpinta on oltava mitattavissa myös läpinäkyvän materiaalin läpi. Tämä on tärkeää sovelluksissa, missä työstetään läpinäkyvän materiaalin läpi esimerkiksi hitsattaessa yläpuolinen kappale kiinni alapuoliseen lasersäteen kulkiessa ylemmän kappaleen läpi. Koskettavamittaus ei sovellu tehtävään, koska materiaalin läpi ei ole mahdollista mitata ja anturin mittauskärki saattaa vaurioittaa muissa mittauksissa työkappaleen pintaan.

Tarkkoja, ei koskettavaan mittaukseen perustuvia, menetelmiä on useita, mutta monet menetelmistä asettavat rajoituksia esimerkiksi materiaalin suhteen. Pyörrevirtaan perustuvat anturit toimivat vain metalleilla ja kapasitiiviset anturit vaativat sähköä johtavan materiaalin (puolijohteiden mittaaminen myös mahdollista) eli kummatkin anturityypit rajoittavat liikaa mitattavia materiaaleja. Optisista mittalaitteista tarkoitukseen hyvin sopivia ovat konfokaali- ja kolmiomittaukseen perustuvat anturit. Kumpikaan antureista ei aseta suoraan rajoituksia materiaalille, mutta valon heijastuminen takaisin anturille on huomioitava. Erittäin voimakkaasti valoa absorboivat sekä valoa anturilta pois heijastavat pinnat, kuten vinot peilipinnat, ovat vaikeita mitata. Läpinäkyvien materiaalien pintojen mittaus on myös mahdollista näillä tekniikoilla, joten esimerkiksi lasista voidaan mitata sekä ylä- ja alapinta.

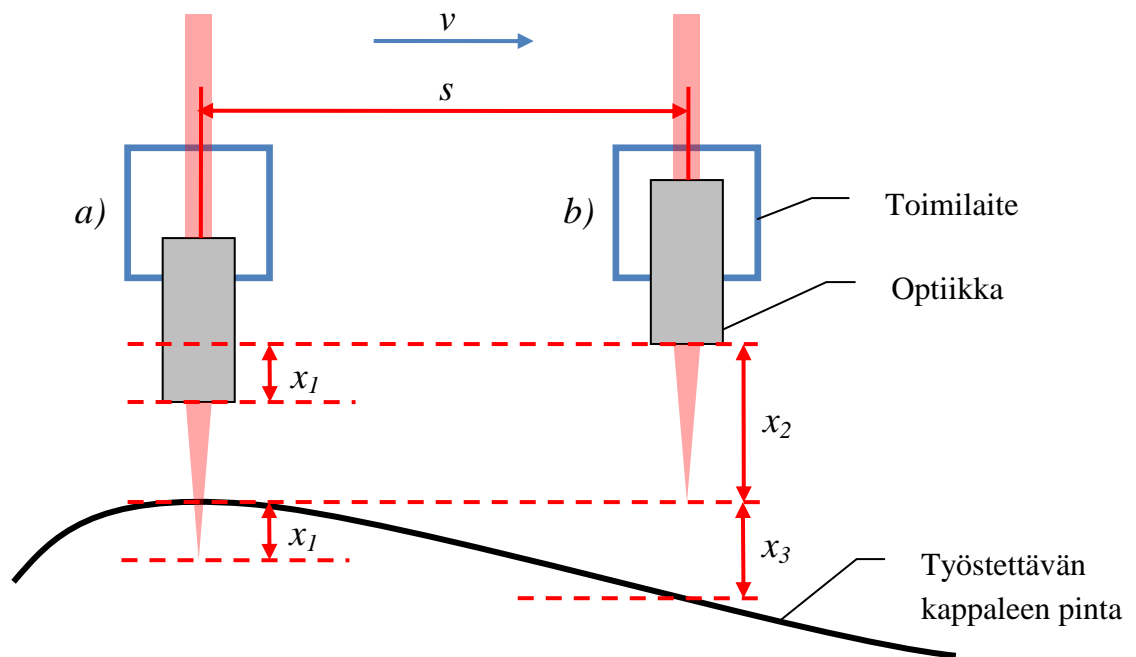
Mittaustapaan on useita eri mahdollisuuksia. Jos pinta mitataan etukäteen ennen varsinaista työstöä, on anturin sijoitus melko vapaata ja liikenopeuksien ei tarvitse olla välttämättä samat mittauksessa ja työstössä. Ennen työstöä mitattaessa on myös mahdollista hyödyntää suurempia alueita kerralla mittaavia tekniikoita, kuten konenäköpohjaisia strukturoitua valoa hyödyntäviä menetelmiä tai laserviivaskannausta. Näillä tekniikoilla voidaan kohtuullisessa ajassa mitata koko kappaleen pinta, mutta pelkästään työstön kannalta suurin osa informaatiosta ei yleensä ole hyödyllistä. Tarkkuus voi olla myös riittämätön ja mittaustulosten muuttaminen fokuuspisteen ohjaukseen sopivaan muotoon voi olla haastavaa. Haittapuolena ennen työstöä suoritettavassa mittauksessa on myös kokonaistyöstöajan kasvaminen mittausajan verran. Riskinä on lisäksi työstön aikana tapahtuvat muutokset, kuten työstökohteen pinnan siirtyminen esimerkiksi liikuttelulaitteiston tai työstökohteen lämpenemisen vuoksi. Tällöin aikaisemmin mitatut arvot eivät enää pidä paikkaansa. Riski muutoksista kasvaa sitä suuremmaksi, mitä suurempi osa työstöalueesta mitataan etukäteen.

Mittaukseen sopivimmaksi vaihtoehdoksi katsottiin yllä esitettyjen syiden pohjalta optinen mittaus käyttäen joko kolmio- tai konfokaalimittausta ja mittaus suoritettaisiin reaaliaikaisesti työstön aikana. Mittaustulosten mukaan ohjataan pietsotoimilaitetta, joka liikuttaa fokuisoivan optiikan oikealle korkeudella suhteessa työstettävän kappaleen pintaan. Anturien sijainnin ja mittauspisteen kannalta on tärkeää huomioida, että nopeintaan toimilaite eivät pysty välittömästi muuttamaan asemaa, vaan ohjausarvosta todelliseen asemaan saavuttamiseen muodostuu aina viive. Jos mittaus suoritetaan samalta optiselta akselilta lasersäteen kanssa ja mittaustulosta käytetään optiikan sijainnin ohjaamiseen, seuraa optiikka aina viiveellä mitatun pinnan muotoja. Viiveestä johtuvan virheen suuruus riippuu toimilaitteen suorituskyvystä ja pinnan muotojen vaihteluiden koosta. Kaavan 13 mukaisesti esimerkiksi liikenopeuden ollessa 1000 mm/s aiheuttaa 10 ms viive mittauksen perusteella muodostetun ohjausarvon ja toimilaitteen todellisen aseman välillä jo aseman saavuttamisen vasta 10 mm päässä mitatusta kohdasta. Kaavassa 13 s on liikematka, v liikenopeus ja t viive.

$$s = vt$$

(kaava 13)

Viiveen vaikutusta on havainnollistettu kuvassa 3.1. Kohdassa a) on esitetty alkutilanne, jossa toimilaitte liikkuu nopeuden v suuntaisesti suhteessa työstettävän kappaleen pintaan. Alkutilanteessa optiikan asema poikkeaa toivotusta sijainnista x_1 verran. Toimilaitteen viiveen vuoksi optiikka kuitenkin saavuttaa a) kohdassa tavoitellun aseman x_2 vasta matkan s jälkeen kohdassa b). Kappaleen pinnan korkeus on kuitenkin ehtinyt muuttua liikkeen aikana ja tehdyn korjauksen jälkeen optiikan polttopisteen sijainti ei ole oikea, vaan poikkeaa x_3 verran kappaleen pinnasta.

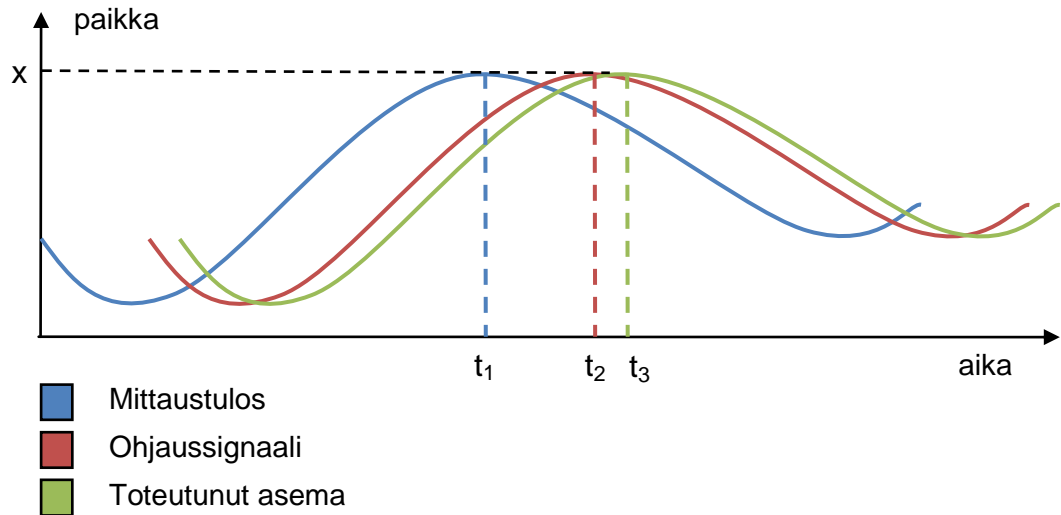


Kuva 3.1 Toimilaitteen viiveen vaikutus pinnan seurannassa suoritettaessa mittaus samalta kohtaan lasersäteiden kanssa.

Pietsotoimilaitteet reagoivat nopeasti ohjaussignaalin muutokseen, mutta silti niiden viive ohjausarvosta saavutettuun asemaan voi olla useita kymmeniä millisekunteja. Korkeilla työstönopeuksilla tämä tarkoittaa polttopisteen seuraamista pahimmassa tapauksessa useita kymmeniä millimetrejä työstökohtaa perässä pinnan mittauksen tapahtuessa samasta paikasta työstön kanssa. Ongelman ratkaisemiseksi mittauspaikka siirrettiin liikesuunnassa eteenpäin pois samasta kohtaa lasersäteiden kanssa. Kuvan 3.1 mukaisessa tapauksessa järjestely tarkoittaisi mittauksen suorittamista b) kohdassa optiikan ollessa a) kohdassa. Tällöin saavuttaessa b) kohtaan toimilaitte on ehtinyt säätää optiikan oikealle korkeudella suhteessa pintaan.

Asiaa on havainnollistettu kuvassa 3.2, jossa näkyy anturin mittaustulos, toimilaitteen ohjaussignaali ja toimilaitteen asema. Ajanhetkellä t_1 anturi mittaa työstettävän kohteen pinnan sijainnin x ja välittää tämän aseman t_1 ja t_2 välisen viiveen kuluttua toimilaitteen

ohjaimelle. Toimilaitteella kestää t_2 ja t_3 välinen aika saavuttaa ohjaimen käskemä asema x . Viive välillä t_1 ja t_3 on suhteessa liikenopeuteen v kaavan 13 mukaisesti, missä s on anturin mittauskohdan ja lasersäteen välinen etäisyys. Toimiakseen ohjaustapa edellyttää, että toimilaitteen viive on tiedossa ja vakio sekä XY -tasossa liikutaan vain yhteen suuntaan eli toimilaitteesta kohti anturia.



Kuva 3.2 Viiveet etukäteen suoritettun mittauksen, ohjaussignaalin ja toteutuneen aseman välillä.

Vain yhteen suuntaan työskentäminen on hidasta ja urien tehokas työstö vaatii mahdollisuuden edestakaiseen työstöön, jossa työstö suoritetaan sekä meno- että paluuliikkeessä. Edellä mainittua ohjaustapaa käyttäen edestakainen liike vaatii kaksi anturia, jotka sijoitetaan optiikan eteen ja taakse. Vaihtoehtoisesti voidaan liikuttaa anturia puolelta toiselle. Anturia siirrettäessä liikkeen ja paikoituksen täytyisi olla kuitenkin nopea ja tarkka, joten kahden anturin ratkaisu on käytännöllisempi. Suorien urien kulmaa XY-tasossa voidaan muuttaa esimerkiksi pyörityspöydän avulla, jolla käännetään työkalupallettia. Tällöin esimerkiksi ristikkäisten urien teko on mahdollista.

Tyypillisimmät sovelluskohteet lasertyöstölaitteistolle, joille pinnanseurantajärjestelmää ollaan ensisijaisesti suunnittelemassa, sisältävät työstöradoiltaan vain suoria uria. Näissä lasertyöstöasemissa laitteiston rakenne on suunniteltu suorien urien työstöä varten, joten työstöratojen rajoittuminen suoriin uriin ei ole ongelma. Työstöurien rajoittuminen suoriin viivoihin on kuitenkin hyvin merkittävä mietittäessä korkeudenseurantajärjestelmän käyttöä muissa sovelluskohteissa, kuin ensisijaisesti suunnittelun lähtökohtana olevissa prosesseissa.

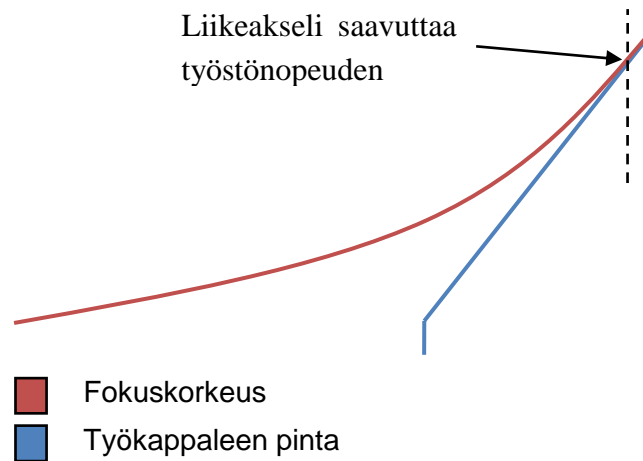
Anturien sijoittaminen kohdistavan optiikan viereen poistaa myös ongelmat, jotka olisivat seurauksena samasta pisteestä kohdistetun lasersäteen kanssa mittaamisesta. Mitattaessa samasta pisteestä lasersäteen kanssa täytyy lasersäteelle ja mahdollisille proses-

sointikaasuille turvata esteetön reitti kohteeseen sekä huomioida hyvin rajoittunut tila fokusoivan optiikan ja työstökohteen välissä. Lisäksi on otettava huomioon työstöstä mahdollisesti syntyvät kaasut, roiskeet, kirkas valo ja sulamateriaali, jotka voivat haitata mittauksia tai vaurioittaa mittalaitteita.

Samasta pisteestä mitattaessa lasersäteen kanssa on kuitenkin etuna integroitavuus ja liikesuunnan vapaus. Integroitavuus lasertyöstöasemaan on yksinkertaista, koska liikesuuntaa tai -nopeutta ei tarvitse tietää ja korkeudensäädön on helppo toimia itsenäisenä yksikkönä. Mittaustuloksen mukaan tarvitsee vain pyrkiä säätämään toimilaitteen asema mahdollisimman nopeasti vastaavaan paikkaan. Liikesuunnilla ei ole myöskään rajoituksia ja työstöliikkeet eivät rajoitu suoriin uriin. Samasta pisteestä mittausta soveltuu hyvin kohteisiin, jossa tarvitaan suoria uria monimutkaisempia muotoja ja pinta muuttuu hitaasti. Mittaustapa sopii myös suorien urien työstöön, jos pinta muuttuu hitaasti ajan suhteen tai syvyysterävyys alue on laaja, jolloin viiveestä aiheutuva virhe ei kasva liian suureksi.

3.1.3 Mittaustavan vaikutus työstöaikaan

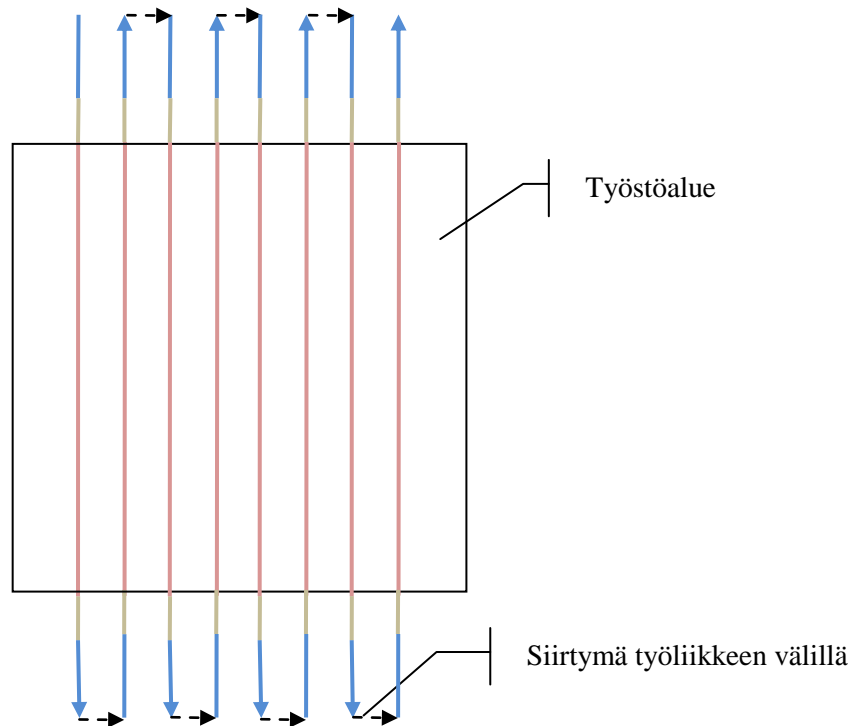
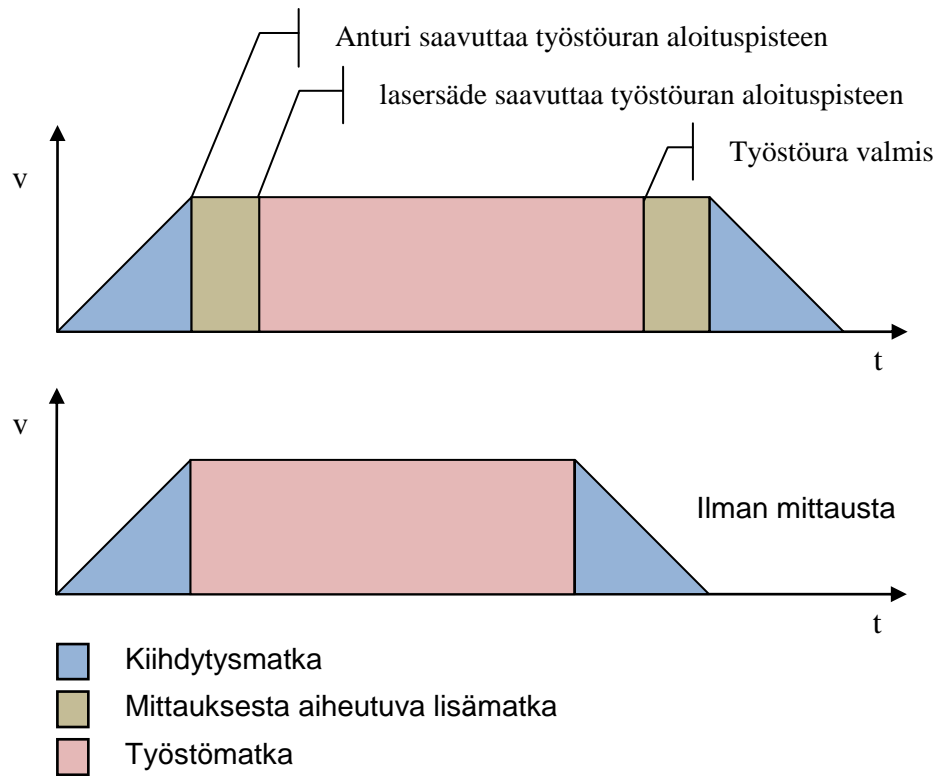
Kahden sivulle sijoitettavan anturin mallissa, jossa mittauksen ja työstön välinen etäisyys huomioidaan aikaviiveellä, on haittapuolena työstösuunnan rajoitusten lisäksi lievä työstöaikojen kasvu. Työstöliike täytyy aloittaa aikaisemmin kuin ilman mittausta työstettäessä tai mitattaessa samalta akselilta lasersäteen kanssa. Liikematka pitenee anturin mittauspisteen ja laserin fokuspisteen välisen matkan verran, koska työstönopeus täytyy olla saavutettuna anturin saapuessa työstöuran aloituspisteeseen. Jos työstönopeutta ei ole saavutettu anturin saapuessa työstöuran aloituspisteeseen, on seurauksena väärä fokuskorkeus. Fokuskorkeus poikkeaa pinnan muodoista matkalta, jonka anturi on kiihtyvässä liikkeessä työstöuran päällä. Esimerkiksi anturin saapuessa työkappaleen päälle kiihtyvässä liikkeessä ja saavuttaessa työstönopeuden vasta myöhemmin työkappaleen yläpuolella näyttäisi fokuskorkeus verrattuna työkappaleen pintaan kuvan 3.3 mukaiselta. Fokuskorkeutta korjattaisiin esimerkissä liian aikaisin ja virhe on sitä suurempi, mitä suurempi nopeusero kohdassa oli mittausta suoritettaessa verrattuna työstöhetken nopeuteen.



Kuva 3.3 Fokuskorkeus kiihtyvässä liikkeessä suhteessa työkappaleen pintaan.

Kiihtyvästä liikkeestä aiheutuu virhettä vain, jos fokuskorkeuden paikkaa säättävän toimilaitteen ohjauksessa käytetään vakioliikenopeuteen perustuvaa aikaviivettä. Käytettäessä ohjausta, missä viiveessä huomioitaisiin työstöliikkeen aikana muuttuva nopeus, ei vastaavaa virhettä pääsisi syntymään ja anturin saapuessa työstöuran aloituspaikkaan ei lopullista työstönopeutta tarvitse vielä olla saavutettuna. Tämä lyhentäisi kokonaisliikematkaa ja nopeuttaisi työstöä. Fokuskorkeutta muuttavan toimilaitteen ohjauksessa päädyttiin kuitenkin vakioliikenopeuteen pohjautuvan viiveen käyttöön, koska näin saatiin työaseman ja toimilaitteen rajapinnasta yksinkertainen ja vältettiin monimutkaisemmasta ohjaustavasta johtuvat mahdolliset virheet.

Useita uria rinnakkain työstettäessä täytyy huomioida myös, että anturin mittauspisteen ja laserin fokuspisteen välinen etäisyys ei vaikuta vain työstöliikkeen alussa. Työstöliike joudutaan alussa aloittamaan mittauksen vuoksi kauempaa, mutta myös työstöuran valmistumisen jälkeen siirryttäessä pidemmälle seuraavan työstöliikkeen alkuun. Seuraavan työliikkeen aloituspiste on myös vastaavan lisämatkan pidemmällä, joten kokonaisliikematka (kiihdytys, anturin vaatima lisämatka, työstöura ja siirtymä seuraavan työliikkeen alkuun) on kaksi kertaa anturin ja lasersäteen välisen etäisyyden verran pidempi. Siirtymät työstöurien välillä ovat yleensä lyhyitä verrattuna muuhun liikematkkaan ja voidaan suorittaa usein samaan aikaan työstöuran suuntaisen jarrutuksen kanssa ilman kokonaistyöstöajan kasvua. Kuvassa 3.4 on havainnollistettu asiaa nopeuden muutoksena ajan suhteen, jossa liikematka on kunkin alueen pinta-ala sekä kuvaamalla liikeradat suhteessa työstöalueeseen.



Kuva 3.4 Etukäteen suoritettun mittauksen vaikutus työstöaikaan ja -matkaan.

Yhteen uraan kulutettuun aikaan vaikuttaa: kiihtyvyys, työstönopeus, työstöuran pituus ja anturin ja lasersäteen välinen matka. Nopeusprofiili on tyypillisesti kuvan 3.4 mukainen. Aluksi vakiokiihtyvyydellä nostetaan liikenopeus työstössä käytettäväksi ja edetään tämän jälkeen vakionopeudella, kunnes lopuksi lasketaan nopeutta pysähtyen seuraavan työliikkeen alkupisteen kohdalle. Liikenopeutta kasvattamalla työstömatkaan ja

mittauksesta aiheutuvaa lisämatkaan kuluva aika voidaan lyhentää, mutta toisaalta työstönopeuden saavuttamiseen ja jarrutukseen kuluva aika kasvaa. Lyhentämällä mittapisteen ja lasersäteen välistä etäisyyttä saadaan mittauksesta aiheutuvaa lisämatkaa kavennettua, mutta kohdistavan optiikan, anturin ja tukirakenteiden fyysiset mitat asetavat rajoituksia kuinka lähelle anturi voidaan asettaa optiikkaa. Myös optiikkaa liikuttavan toimilaitteen viive vaikuttaa korkeilla nopeuksilla, kuinka kaukana mittauspiste täytyy vähintään olla lasersäteestä. Jos mittauspiste on liian lähellä lasersädettä, toimilaitte ei välttämättä ehdi reagoida riittävän nopeasti työkappaleen pinnanvaihteluihin.

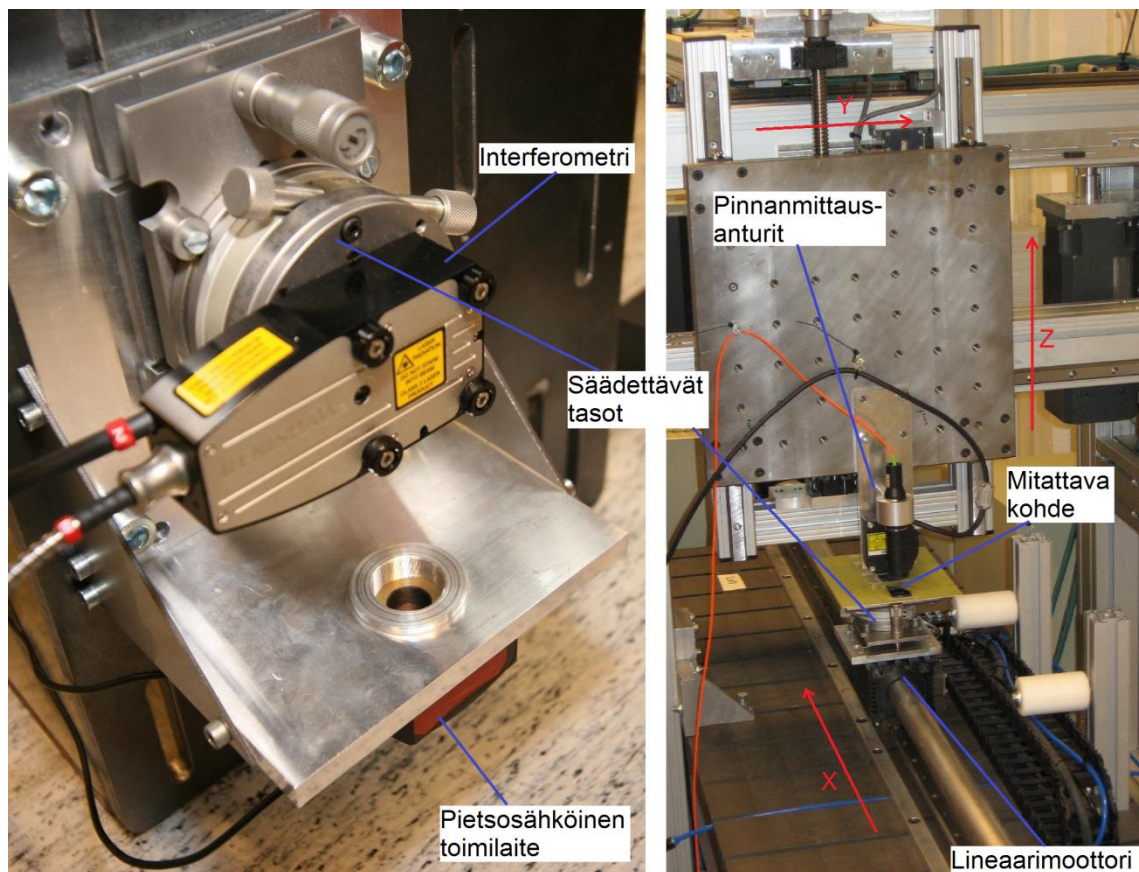
Liitteessä 1 on esitetty nopeuden ja uran pituuden vaikutus yhden uran valmistusaikaan. Kiihdytykseen ja jarrutukseen yhteensä kuluva aika on merkitty taulukoissa t_a . Uran työstöön kuluva aika on t_{ura} , johon kuuluu myös mittauksesta aiheutuva lisämatka. Kokonaisaika yhden uran valmistamiseen on merkitty t_{kok} ja prosentuaalinen kasvu ilman mittausta suoritetusta työstöstä mittauksen kanssa suoritettuun on merkitty muutos-sarakkeeseen. Arvot ovat laskennallisia eivätkä perustu mittauksiin. Taulukoista näkyy selvästi, että prosentuaalinen muutos on pienimmillään käytettäessä suuria nopeuksia ja liikematkoja. Nopeutta kasvatettaessa työstöuraan käytetty aika pienenee ja kiihdytykseen ja jarrutukseen kuluva aika kasvaa. Tämän seurauksena mittauksesta johtuva liikematkan kasvu muuttuu vähemmän merkitykselliseksi. Työstöuran pituudella on myös hyvin tärkeä merkitys, koska lyhyillä työstöuran pituuksilla mittauksesta aiheutuva lisämatka kasvaa suureksi suhteessa työstöuraan ja työstöaika kasvaa selvästi ilman mittausta suoritettuun.

3.2 Ensimmäiset laitteistotestit

Ensimmäisissä laitteistotesteissä oli käytössä kolme eri anturia: Mikro-epsilon konfokaalianturi IFS 2401-3, Keyencen kolmiomittausanturi LK-H008 ja Renishawn interferometri RLD10. Konfokaali- ja kolmiomittausanturia käytettiin työkappaleen pinnan mittaamiseen ja interferometriä pietsosähköisen toimilaitteen aseman mittaamiseen. Kaikilla antureilla oli käytössä oma ohjain, jonka kautta sai säädettyä anturin toimintaan vaikuttavia parametreja kuten mittaustaajuutta. Pinnan mittaamiseen tarkoitetut anturit olivat asetettu tasolle, jota voidaan liikuttaa y- ja z-suunnassa kuularuuvivälityksen ja sähkömoottorien avulla. Mitattavat työkappaleet olivat tasolla, jota liikutetaan lineaarimoottorilla x-akselin suuntaisesti.

Ensimmäisissä testeissä ei ollut käytössä laseria ja pietsotoimilaitteella siirrettiin linssin sijaa pelkästään tasopeiliä. Pietsotoimilaitteen siirtymä voitiin määrittää interferometrin avulla mittaamalla peilin siirtymä. Pietsotoimilaitetta ei ollut laserin puuttuessa välttämätöntä sijoittaa mitattavien kohteiden yläpuolella ja pietsotoimilaitte sijoitettiinkin selvästi erilleen mitattavista kohteista tukevaan kehikkoon. Sijoituspaikka helpotti laitteiden asentamista ja kytkentöjen tekemistä.

Interferometri ja mitattavat kohteet olivat asetettu manuaalisesti säädettävien tasojen päälle, joilla voitiin varmistaa oikea orientaatio. Interferometrin kiertymä on mahdollista säätää x- ja y-akselin ympäri ja mitattavien kohteiden kiertymä y- ja z-akselien ympäri. Tasopeili-interferometrissa mitattavan kohteen peilipinta täytyy olla hyvin tarkasti kohtisuorassa suhteessa interferometrin säteeseen ja käytetyssä interferometrissa sallittu kulmavirhe on vain ± 25 kulmasekuntia yhden metrin etäisyydellä [25]. Mitattavat kohteet saatiin säädettävän tason avulla haluttuun kulmaan suhteessa antureihin, jolloin testeissä voitiin kokeilla erilaisten kallistusten vaikutusta. Anturien ja toimilaitteiden sijainnit ovat esitetty kuvassa 3.5.

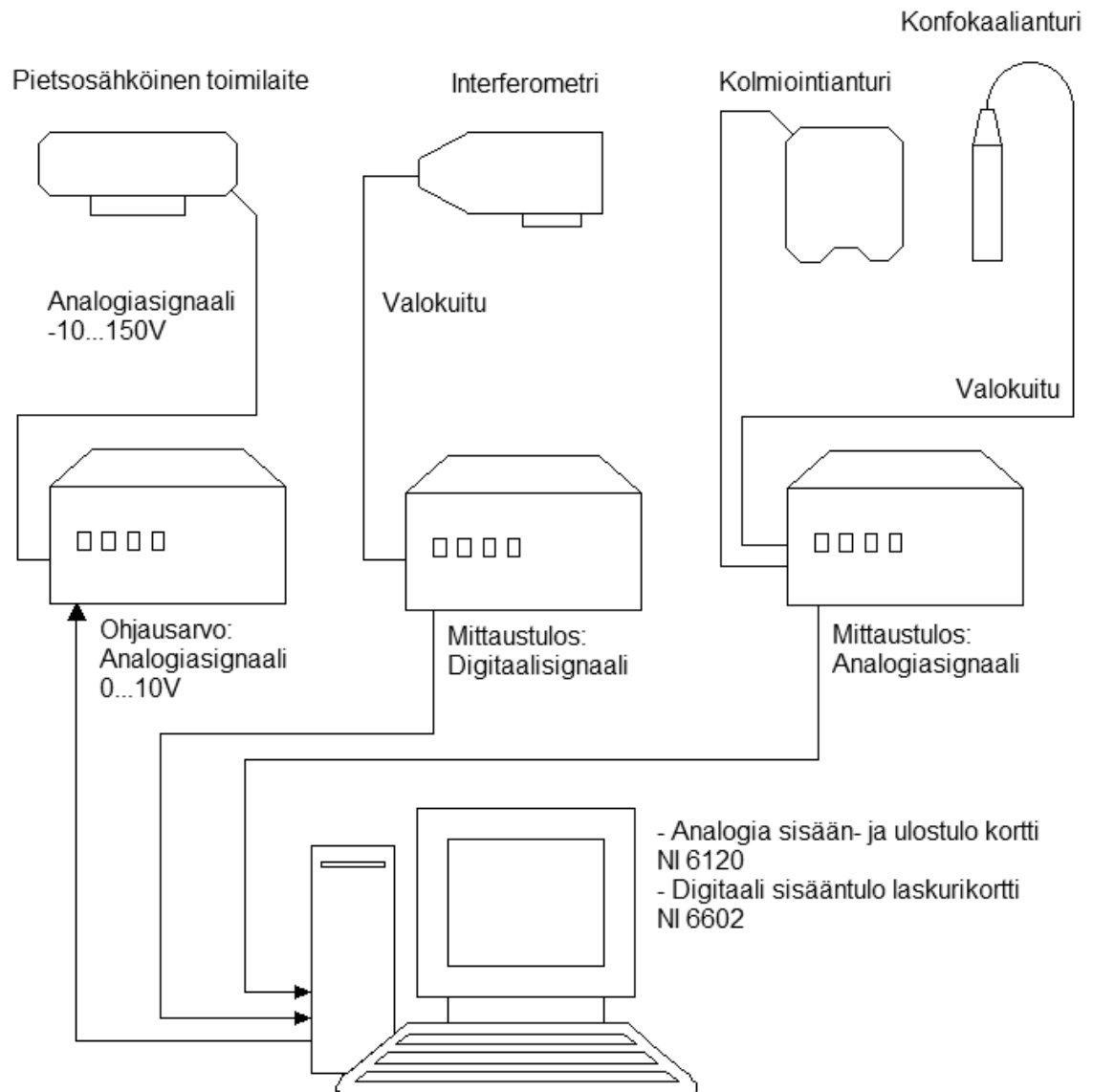


Kuva 3.5 Anturit ja toimilaitteet.

Konfokaali- ja kolmiomittausanturi antavat absoluuttiaseman eli asema pystytään aina määrittämään kohteen ollessa mittausalueella. Interferometri antaa inkrementaaliaseman eli laskee muutoksen aikaisempaan asemaan. Erona absoluuttimittauksella ja inkrementaalimittauksella on, että inkrementaalimittauksessa ei ole kiinteä nollakohtaa ja esimerkiksi sähkökatkon tai mittauksen keskeytyessä muusta syystä, joudutaan nollapisteenhaku suorittamaan uudestaan.

Mittaustuloksien lukemiseksi oli kaikkien anturien ohjaimissa useampia vaihtoehtoja. Konfokaali- ja kolmiomittausantureilla käytettiin analogista ulostuloa tai tietokoneella USB-väylän kautta arvojen lukemista digitaalisessa muodossa. Antureiden analogiaulostuloa luettiin National Instrumentsin NI 6120 -kortin avulla, jolla voidaan samana-

kaisesti lukea neljää analogiasisääntuloa ja kirjoittaa kahta analogiaulostuloa [26]. Interferometrin mittaustulos siirtyi anturin vahvistimelta digitaalisena pulssijonona, jota luettiin National Instrumentsin NI 6602 laskurikortilla. NI 6602 –kortilla voitiin lukea maksimissaan 80 Mhz taajuisia signaaleja [27], joka oli riittävä Interferometrin ohjaimen tuottamia maksimissaan 20 Mhz taajuisia signaaleja [18] varten. Kummatkin kortit olivat PCI-väylän kautta kytkettyinä tietokoneeseen. Laitteiden väliset kytkennät on esitetty kuvassa 3.6.



Kuva 3.6 Laitteiden väliset kytkennät.

Jokainen interferometrin vahvistimen antama yksi pulssi vastasi tiettyä matkaa ja testeissä käytössä oli 39,5 nm resoluutio. Todellinen mittaustarkkuus ei käytännössä ollut yhtä hyvä johtuen muun muassa lämpötilan vaihteluista ja ympäristön tärinästä, joita ei huomioitu mittauksia tehdessä. Järjestelmän testauksen kannalta vaihtelut eivät kuitenkaan aiheuttaneet merkittävää virhettä tavoitellussa noin mikrometrin tarkkuusluokassa. Konfokaali- ja kolmiomittausanturien tapauksessa virhettä muodostui myös analogiseen signaaliin sähköisistä häiriöistä, joiden lähdettä ei saatu varmuudella selville. Sähköis-

ten häiriöiden osuus oli jo merkittävä tavoiteltavassa tarkkuusluokassa ja ne saattoivat aiheuttaa pahimmillaan useita mikrometrejä vastaavia häiriötä mittaustuloksiin.

Antureilta saatava analoginen mittaustulos skaalattiin pietsotoimilaitteen vahvistimelle sopivaksi ohjausarvoksi. Skaalauksessa huomioitiin pietsotoimilaitteen 300 μm liikealueen poikkeaminen pintaa mittaavien anturien mitta-alueesta, joka oli kummallakin anturilla suurempi (kolmiomittausanturilla 1 mm ja konfokaalianturilla 3 mm). Skaalauksessa käytettiin kahta eri tapaa: Joko vain osaa anturin mitta-alueesta hyödynnettiin, jolloin pietsotoimilaitte liikkui samassa suhteessa mittaustuloksen kanssa, tai haluttaessa testata koko anturin mitta-aluetta kerrottiin pietsotoimilaitteen liike jakamalla toimilaitteen liikealue anturin mitta-alueella.

3.3 Prototyyppi

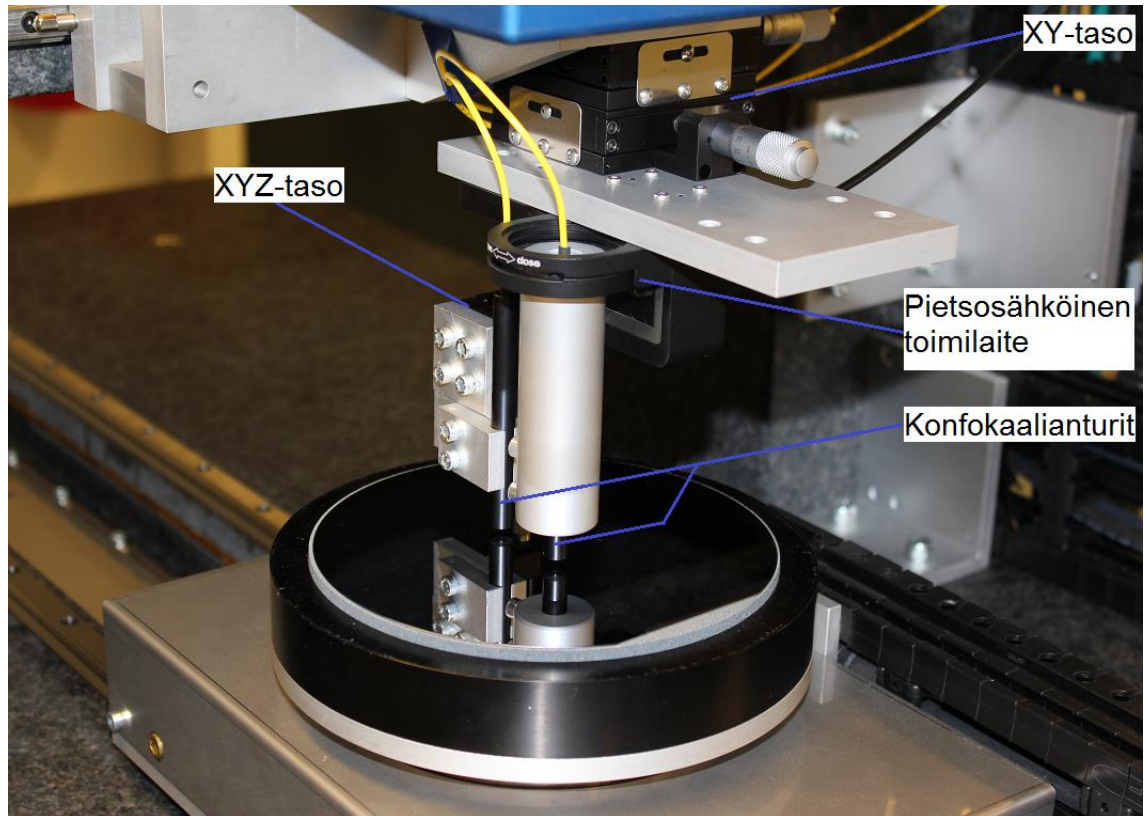
Ensimmäisten laitteistotestien perusteella rakennettiin prototyyppi, joka liitettiin osaksi valmista lasermikrotyöstöasemaa. Ensimmäisten laitteistotestien järjestelmä ja prototyyppi olivat lähellä toisiaan laitteiden välisten kytkentöjen ja ohjelmiston osalta, mutta etenkin pietsotoimilaitteen, mekaanisten kiinnikkeiden ja laitteiden asemoinnin välillä oli suuria eroja. Käytettävä pietsotoimilaitte oli vaihdettu uudempaan ja ominaisuuksiltaan paremmin tehtävään sopivaksi. Merkittävin ero toimilaitteiden välillä oli uudessa toimilaitteessa ollut paikkatakaisinkytkentä ja PI-säätäjä. Pinnan mittaamiseen käytettiin kahta Micro-Epsilonin IFS 2403-0.4 konfokaalianturia, joiden mitta-alue oli selvästi pienempi kuin ensimmäisessä versiossa käytetyillä antureilla. Prototyypissä antureiden mitta-alue ja pietsotoimilaitteen liikealue olivat kummatkin 400 μm suuruiset.

Prototyypin liittämistä lasertyöstöasemaan auttoivat yksinkertainen kiinnitys ja riittävä säätövara, joilla anturit ja linssi saatiin tarkasti oikeisiin paikkoihin. Järjestelmä kiinnitettiin ruuveilla z-akseliin ja oikea kulma varmistettiin kohdistustapeilla. Lasersäde pyrittiin tuomaan linssiin mahdollisimman kohtisuorassa ja keskelle sisääntuloaukkoa. Linssin linjausta varten oli XY-taso, jota voitiin manuaalisesti liikuttaa kahden mikrometriruuvin avulla. XY-tasoon kiinnitettiin linssiä liikuttavan pietsotoimilaitteen lisäksi myös kaksi manuaalisesti liikuteltavaa XYZ-tasoa kumpaakin konfokaalianturia varten. Etuna antureiden ja linssin kiinnityksessä samaan XY-tasoon oli, että linjatessa linssin ja anturien väliset suhteet eivät muutu. Kaikki tasot olivat lukittavia, millä varmistettiin säädetyn aseman pysyminen käytössä.

Konfokaalianturien asemoinnissa oli tärkeää huomioida, että anturit olivat tarkalleen liikesuunnassa eli etukäteen mitattu kohta on sama, johon myös lasersäde osuu myöhemmin. Etäisyys anturin mittauskohdan ja lasersäteen polttopisteen välillä täytyi myös pystyä tarkasti määrittämään, koska se vaikutti tarvittavan viiveen suuruuteen saadun mittaustuloksen ja toimilaitteen ohjaussignaalin välillä. Toimilaitteen asema säädettiin puoleen väliin liikealueesta anturin tuloksen ollessa mitta-alueen keskellä (200 μm), että

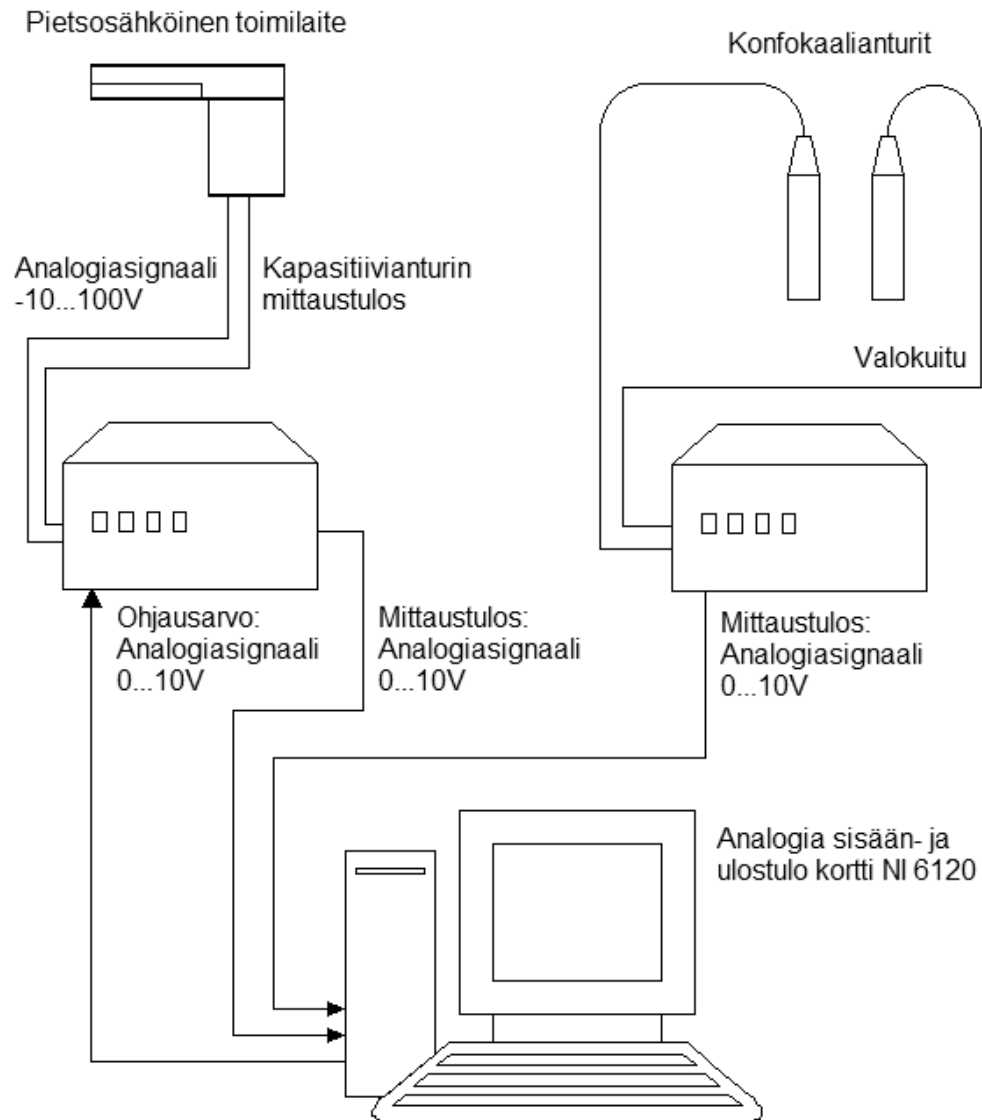
koko anturin mitta-alue ja toimilaitteen liikealue (kummatkin 400 μm) saatiin hyödynnettyä.

Laitteiston koekäytössä ja tehdyissä testeissä käytettiin vain toisella puolella olevaa konfokaalianturia, minkä seurauksena korkeudensäätö toimi vain toiseen liikesuuntaan. Toista konfokaalianturia käytettiin osassa testeistä linssin paikalla, jolloin oli mahdollista mitata, miten linssin asema muuttuu työstöliikkeen aikana suhteessa työstettävän kappaleen pintaan. Kuvassa 3.7 on esitettyä laitteiston rakenne.



Kuva 3.7 Prototyyppi kiinnitettynä lasertyöstöasemaan.

Physik Instrumenten toimittamaan kokonaisuuteen kuului pietsosähköisen toimilaitteen lisäksi vahvistin, PI-säätäjän ja digitaalinen ohjainmoduulin. Toimilaitteen paikkata-
kaisinkytkentää varten oli sisäänrakennettu kapasitiivianturi, joka mittasi toimilaitteen
asemaa. Asema esitettiin toimilaitteen vahvistimelta ulostulevana 0...10 V analogiasig-
naalina, joka luettiin NI 6120 kortilla. Konfokaalianturit olivat valokuiduilla kiinni vah-
vistimessa ja mittausarvot tuotiin ulos analogiasignaali muodossa. Kytkenät ovat esi-
tettynä kuvassa 3.8.



Kuva 3.8 Prototyypin laitteiden väliset kytkennät.

Viiveen generoimisessa käytettiin ensimmäisten laitteistotestien tapaan Labview-ohjelmaa, mutta viiveen suuruudessa oli huomioitu toimilaitteen vaihtumisen myötä muuttunut reagointiaika. Toimilaitteen aseman mittaaminen tapahtui myös erilailla, sillä prototyypissä mitattiin analogiasignaalia aikaisempien testien digitaalisten pulssien laskeamisen sijaan.

3.4 Ohjelmisto

Mittaustulosten lukemiseen ja ohjausarvon generointiin käytettiin National Instrumentsin Labview 2009 -ohjelmaa. Ohjelman alussa suoritettiin alustustoimenpiteet, jonka jälkeen luettiin pintaa mittaavalta anturilta mittaustulos ja mittaustuloksen perusteella muodostettiin pietsotoimilaitteen vahvistimelle ohjaussignaali. Mittaustuloksen ja siihen perustuvan ohjaussignaalin välillä oli säädettävissä oleva viive. Toimilaitteen asema luettiin ensimmäisissä laitteistotesteissä digitaalisignaalin ja prototyypissä analogiasig-

naalin perusteella. Mahdollisissa virhetilanteissa ohjelman suoritus keskeytettiin automaattisesti.

Ohjelmaan ei ollut vielä toteutettu mahdollisuutta vaihtaa anturia ohjelman suorituksen aikana eli analogiasisääntuloa ei voi vaihtaa liikesuunnan mukaan. Myös viiveen suuruus mittauksen ja toimilaitteen ohjauksen välillä oli vakio ohjelman suorituksen ajan. Näitä toimintoja varten pitäisi tulevaisuudessa määrittää rajapinta käytettävän laser-työaseman kanssa. Työaseman kautta tulisi tieto liikesuunnasta ja nopeudesta, jonka perusteella saataisiin laskettua tarvittava viive.

3.4.1 Alustustoimenpiteet

Ohjelman käynnistyessä suoritettiin alustustoimenpiteet, joilla asetettiin ohjelma ja laitteet valmiiksi pinnanseurantaa varten ja määritettiin käytettävät parametrit. Alustustoimenpiteisiin kuuluivat seuraavat asiat:

- Määritetään korteilta luettavat ja kirjoitettavat kanavat.
- Asetetaan kanavien luku- ja kirjoitustaajuuudet. Työstöpintaa mittaavien anturien analogiasisääntulojen lukutaajuus ja pietsotoimilaitetta ohjaavan analogiaulostulon kirjoitustaajuus on oltava sama, että analogiaulostuloon ei tule liian tiheään tai harvaan arvoja.
- Asetetaan analogiakanavien jännitealueet. Jännitealueen mukaan määräytyy myös kanavien lukutarkkuus. Käytetylle ± 10 V lukualueelle absoluuttinen tarkkuus on 5,0552 mV. Ulostulolle tarkkuus on riippumatta jännitealueesta 6,7 mV. [26]
- Otetaan käyttöön NI 6120 -kortin rautatason viidennen asteen Bessel-alipäästösuodin 100 kHz taajuudelle. Suodattimella poistetaan korkeataajuiset häiriösignaalit analogisista sisääntuloista.
- Asetetaan pietsotoimilaitteen alkuasema eli toimilaitteen asemaa ohjaavaan analogiaulostuloon syötetään vakiojännite.
- Vakiojännitteen syöttöajan perusteella määräytyy myös pintaa mittaavien antureiden ja pietsotoimilaitteen ohjauksen välinen viive. Viive määräytyy kaavan 14 mukaisesti kirjoittamalla x määrä arvoja ulostuloon eli viive t on

$$t = xf. \quad (\text{kaava 14})$$

Kirjoitustaajuus f määrittelee pienimmän portaan, jolla viivettä voidaan muuttaa (mutta ei viiveen tarkkuutta) eli 1000 Hz kirjoitustaajuus sallii minimissään 1 ms muutokset ja 100 Hz taajuus vastaavasti 10 ms muutokset.

- Synkronoidaan kaikki kanavat aloittamaan mittaukset ja kirjoitus samalla ajanhetkellä, että kanavien välisiä viiveitä ja suhteita voidaan vertailla keskenään.

- Interferometriä käytettäessä ohjelman aluksi ajetaan nollausajo inkrementaalisen mittaustavan vuoksi eli pietsotoimilaite ajetaan nolla-asemaan, odotetaan toimilaitteen asettuvan ja vasta tämän jälkeen aloitetaan mittaus alkuarvosta nolla.
- Interferometriä käytettäessä määritellään myös kuinka pitkää matkaa yksi pulssi vastaa.

3.4.2 Mittaus ja toimilaitteen ohjaus

Alustustoimenpiteiden jälkeen ohjelmantoiminta siirtyi silmukkaan, jota suoritettiin ohjelman lopetukseen asti. Jokaisella silmukan kierroksella suoritetaan seuraavat toimenpiteet:

- Luetaan sisääntulevien analogiasignaalien arvot ja interferometriä käytettäessä pulssilaskurin antama asema. Arvot luetaan kortin sisääntulopuskureista ja silmukan kierroksella luetaan aina kiinteä määrä arvoja.
- Työstöpintaa mittaavalta anturilta luettavat arvot siirretään sisääntulopuskurista analogiaulostulopuskuriin. Signaali voidaan siirron aikana tarvittaessa ohjelmallisesti suodattaa ja skaalata. Suodatuksena käytettiin osassa testeissä viiden arvon keskiarvoistusta. Skaalaus suoritetaan lineaarisesti kaavan 15 mukaisesti

$$Y=mX+b$$

(kaava 15)

jossa m ja b vakiotermi voidaan asettaa vapaasti mahdollistaen esimerkiksi anturin ja linssin fokuksipisteiden välisen erotuksen hienosäädön.

- Esitetään mittaustulokset graafisena kuvaajana, jota päivitetään jokaisella silmukan kierroksella. Tulosten esittämistä varten analogiasisääntulojen jännitearvot skaalataan mikrometreiksi.

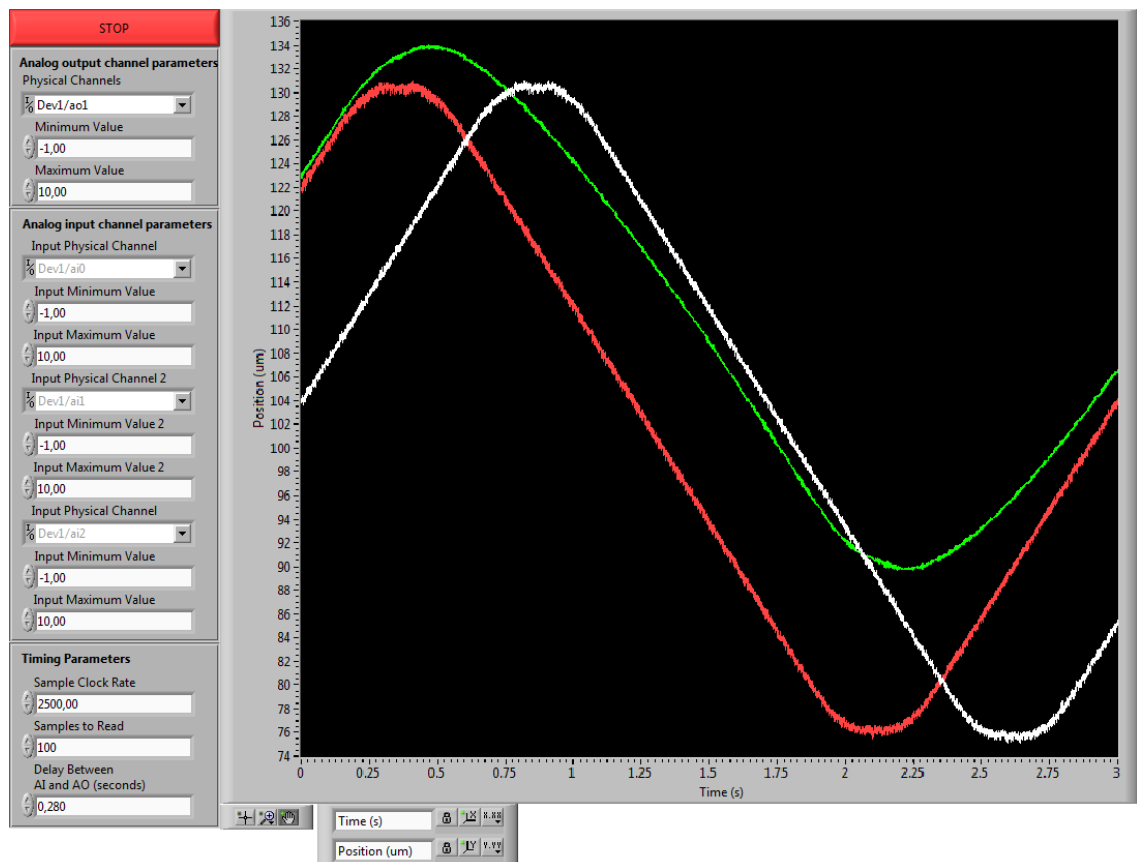
Labview-ohjelmaa suoritettiin Windows 7 – käyttöjärjestelmää käyttävässä tietokoneessa, joten tiukat aikavaatimukset mittauskorttien ulkopuolella tapahtuvaan toimintaan asettivat haasteita. Ongelmaksi muodostui analogiasignaalien sisääntulopuskurin tietojen siirto riittävän nopeasti ulostulopuskuriin käytettäessä lyhyttä viivettä mittauksen ja toimilaitteen ohjauksen välillä. Tätä toimenpidettä ei voitu tehdä vain kortin sisällä, vaan luvut oli ensin luettava tietokoneen muistiin ja sitten siirrettävä tietokoneen muistista kortin ulostulopuskuriin mahdollisen skaalauksen ja suodatuksen jälkeen. Yhden silmukan kierroksen aikana arvojen lukemiseen ja siirtämiseen ulostulopuskuriin ei saanut mennä enempää aikaa kuin käytetyn viiveen verran. Esimerkiksi mittaustaajuuden ollessa 1000 Hz ja käytettävän viiveen ollessa 90 ms voitiin kierroksen aikana lukea vain alle 90 mittaustulosta ja puskurin lukemiseen ja kirjoittamiseen oli alle 90 ms aikaa. Käytetyllä tietokoneella ohjelman toiminta alkoi muuttua epävakaa käytettäessä muutamien kymmenien millisekuntien viiveitä. Käytännön toiminnan kannalta olisi hyvä, että viivettä voitaisiin säätää noin 1 ms tarkkuudella 0...5 s alueella. Testeissä pie-

nimmät viiveet eivät olleet saavutettavissa, mikä oli säätöalueen tärkein osa liikuttaessa suurilla nopeuksilla. Käytettävä viivemekanismi oli riittävä kohtuullisilla nopeuksilla, mutta pienemmille viiveille ohjelman vakauden kärsimättä oli selvä tarve.

Sisääntulevien signaalien suodatuksella voitiin poistaa esimerkiksi sähköisiä häiriöitä. Pietsotoimilaitteen vahvistin suodatti myös pois korkeataajuisia signaaleja, mutta matalammat, lähellä resonanssitaajuutta, olevat signaalit saattoivat aiheuttaa toimilaitteessa epävakaata käyttäytymistä. Signaalien suodatuksen vaikutus toimilaitteen dynamiikkaan oli kuitenkin tärkeää huomioida sillä suodatettu signaali ei vastannut enää alkuperäistä signaalia ja pinnanmuodot saattoivat vääristyä. Etenkin mittaustulokset nopeista pinnanmuutoksista vääristyivät helposti alipäästösuodatusta tai keskiarvoistusta käytettäessä.

3.4.3 Käyttöliittymä

Käyttöliittymän kautta voitiin valita mitattavat sisääntulokanavat ja ulostulo pietsotoimilaitteen ohjausta varten sekä asettaa kanavien jännitealueet. Lisäksi valittiin sisään- ja ulostuloissa käytettävä näytteistystaajuus ja viive pintaa mittaavan anturin ja ulostulon välillä. Käyttöliittymä on esitetty kuvassa 3.9.



Kuva 3.9 Käyttöliittymä.

Anturien mittatulokset ja toimilaitteen asema esitettiin ruudulla kuvaajassa. Eri lähteistä saadut signaalit skaalattiin samalle paikka-asteikoille, jossa asema esitettiin mikrometreinä. Aika-akselilla oli mahdollista valita, kuinka pitkältä ajalta tulokset näytetään. Tuloksia oli mahdollista tarkastella ohjelman pysäyttämisenkin jälkeen ja kuvaajaa voidaan vapaasti tarkentaa.

Käyttöliittymää muokattiin soveltuvien osien esimerkiksi interferometria käytettäessä, jolloin oli mahdollista määrittää muun muassa yhtä pulssia vastaava matka. Suuremmat muutokset kuten analogiasignaalien suodattimien tyyppien vaihto piti tehdä block diagrammin kautta (block diagram vastaa perinteisissä ohjelmointikielissä kirjoitettua koodia).

4 MITTAUS JA TESTAUSJÄRJESTELYT

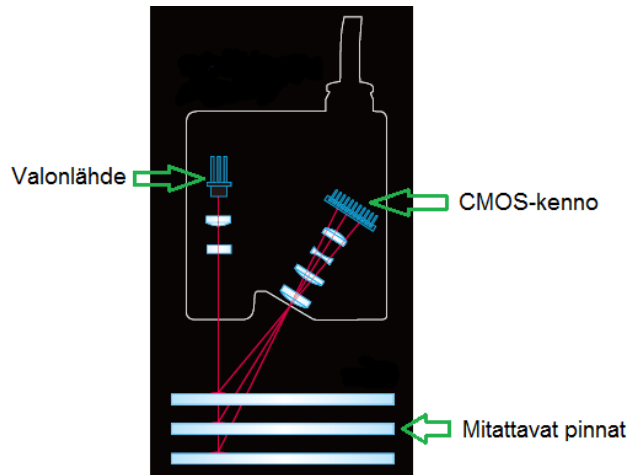
Pinnanseurantaa varten testattiin kahta eri mittausperiaatteella toimivaa anturia ja niiden soveltuvuutta tyypillisille työkappaleille. Anturien lisäksi tehtiin alustavat laitetestit, joilla arvioitiin etukäteen suoritettavan mittauksen ja viiveellä tapahtuvan toimilaitteen ohjauksen käyttökelpoisuutta. Näitä testituloksia hyödyntäen rakennettiin prototyyppi, jolla testattiin pinnanseurantajärjestelmän suorituskkyä osana lasertyöasemaa.

4.1 Anturitestit

Anturitesteissä tarkoituksena oli selvittää kahden erilaisen mittausperiaatteen soveltuvuus pinnankorkeuden määrittämiseen. Testijärjestelyillä pyrittiin luomaan todellisen lasertyöstöaseman kaltaiset olosuhteet, missä näytteitä voidaan liikuttaa tarvittaessa korkeilla nopeuksilla (yli 1000 mm/s). Testeissä mitattavat näytteet olivat tyypillisiä työstettäviä kohteita. Testeissä käytettiin Keyencen LK-H008 ja Micro-Epsilonin IFS 2401-3 -antureita, joista ensimmäinen käyttää kolmiomittausta ja toinen konfokaalimitausta. Antureilla mitattiin tasomaisia näytteitä, jotka olivat materiaaliltaan piitä tai lasia. Mittaukset suoritettiin näytteiden yläpinnasta sekä materiaalien rajapinnasta kohteissa, joissa alempaa materiaalia peitti lasilevy. Mittauksia suoritettaessa anturit olivat paikoillaan ja mittauskohteita liikutettiin lineaarimoottorin avulla yhden akselin suuntaisesti.

4.1.1 Anturit ja mittausjärjestelyt

Kolmioanturin mittausalue oli 1 mm ja mittausresoluutio $\pm 0,02$ % mittausalueesta [28]. Anturi oli kytketty Keyencen LK-G5001(P)-ohjaimeen. Ohjaimen parametreja muuttamalla anturin toimintaa oli mahdollista muokata erityyppisille mittauskohteille kuten peili- tai mattapintaisille sekä läpinäkyville kappaleille sopivaksi. Materiaalien välisiä rajapintoja ja lasien paksuuksia mitattaessa hyödynnettiin kuvan 4.1 mukaista mittausperiaatetta, jossa anturin CMOS-kennolta voitiin lukea yhtä aikaa useammasta kuin yhdestä pinnasta heijastuvien lasersäteiden sijainti.



Kuva 4.1 Kolmiomittausanturin mittausperiaate usealle läpinäkyvälle pinnalle [muokattu lähteestä 28].

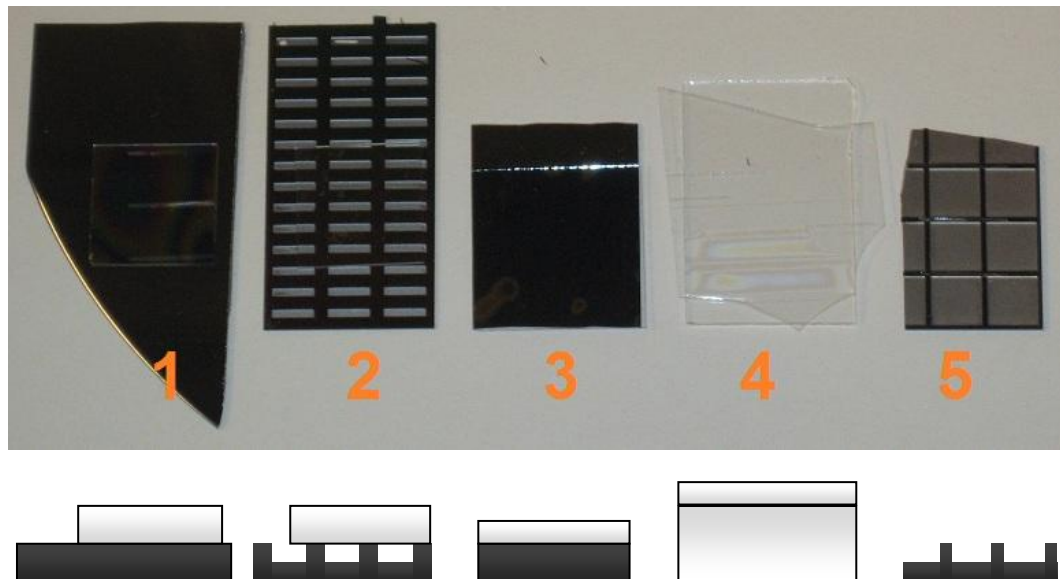
Konfokaalianturin mittausalue oli 3 mm ja mittausresoluutio $0,12\ \mu\text{m}$ [29]. Anturi kytkettiin Micro-Epsilonin IFC2401-ohjaimeen. Myös konfokaalianturin tapauksessa parametrien monipuolinen säätö ohjaimelle oli mahdollista ja näin saatiin anturi paremmin soveltumaan erilaisiin mittauskohteisiin. Konfokaalianturissa oli myös mahdollisuutena kahden eri pinnan yhtäaikainen mittaus.

Näytteiden liikuttamiseen käytettiin samaa laitteistoa, joka on esitetty ensimmäisissä laitteistotesteissä kappaleessa 3.2. Anturien mittauksia ei kuitenkaan siirretty analogisesti, vaan mittaukset siirrettiin USB-väylää pitkin digitaalisesti tietokoneelle. Mittauksia ei myöskään käytetty pietsotoimilaitteen ohjaukseen, sillä tarkoituksena oli pelkästään tutkia kahden eri mittauksen soveltuvuutta tyypillisille työkappaleille. Antureiden sijaintia ei muutettu kesken mittauksien, vaan z- ja y-akseleita liikutettiin ainoastaan ennen mittauksia. Ennen mittauksia näytteet siirrettiin y-suunnassa anturien alle ja z-suunnassa varmistettiin, että näytteiden pinnat pysyivät anturien mittausalueen sisällä. Mittauksen aikainen liike toteutettiin x-suuntaan sähköisellä lineaarimoottorilla, jolla saavutettiin tasainen ja riittävän nopea liike. Mitattavat kappaleet kiinnitettiin tasaiselle muovilevyille, joka puolestaan asetettiin x-akselilla liikkuvan säädettävän tason päälle.

4.1.2 Mitattavat näytteet

Kuvassa 4.2 näkyvät testeissä käytetyt viisi näytettä. Näytteet 1, 3 ja 4 vastasivat laserhitsaussovellusta, jossa lasi hitsataan kiinni pihiin tai toiseen lasiin. Näytteissä 1 ja 3 oli myös pelkästään piin pintaa näkyvissä ilman lasia, mikä vastaa tilannetta esimerkiksi leikkaus-, pinnanstrukturoidi- ja poraussovelluksissa. Näytteissä 1 ja 4 oli myös laserilla tehtyjä uria lasissa eli lasipinnat eivät olleet täysin eheitä. Urien avulla voidaan arvioida jo aikaisemmin tehtyjen tösten vaikutusta mittauksiin. Näytteissä 2 ja 5 oli et-

sattuja altaita, joiden avulla antureiden toimintaa voitiin arvioida myös äkillisten pinnanmuutosten kohdalla.



Kuva 4.2 Mitatut näytteet: 1) piilevy, jonka päällä 500 μm paksu lasi, 2) piilevy, johon etsattu nelikulmaisia altaita ja päällä 500 μm paksu lasi, 3) piilevy, jonka päällä 300 μm paksu lasi, 4) 1000 μm paksu lasilevy, jonka päällä 300 μm paksu lasi, 5) piilevy, johon etsattu nelikulmaisia altaita. Ylhäällä on päältä kuvat ja alhaalle on hahmoteltu poikkileikkaukset näytteistä.

Ilmoitetut lasien paksuudet kuvassa 4.2 ovat pyöristettyjä likiarvoja. Lasin paksuus vaihteli hieman riippuen tarkastelukohdasta ja lasille ei ollut mitattu erikseen paksuuden vaihteluväliä. Lasit ja vastakappaleet puhdistettiin sekä liitettiin yhteen etanolia apuna käyttäen, jolloin kappaleet saatiin mittauksien ajan pysymään kiinni tiivistä toisiinsa.

4.1.3 Anturien asetukset ja säädettävyys

Molempien antureiden toimintaa oli mahdollista monipuolisesti säätää, jolloin anturien toiminta voitiin sovittaa mittaustapahtumaan sopivaksi. Testeissä kaikkia asetuksia ei käyty kattavasti läpi, mutta jo tehtyjen testien perusteella anturien säädettävyydessä voitiin havaita selviä eroja. Anturien asetukset ja säädettävyys eivät varsinaisesti kerro mittausperiaatteen eli konfokaali- ja kolmiomittauksen soveltuvuudesta mittaustapahtumaan, vaan enemmänkin anturivalmistajien tarjoamista ominaisuuksista. Joidenkin ominaisuuksien puuttuminen kuitenkin rajoitti anturin käyttöä mittauksissa, minkä vuoksi rajoitukset otettiin huomioon.

Kummallakin anturilla oli mahdollista säätää valon intensiteettiä sekä manuaalisesti että automaattisesti. Valon intensiteetin säätö oli tärkeää, koska liian pieni tai suuri anturille palaavan valon määrä estää mittaukset. Mittaustaajuus vaikutti myös anturille palaavaan

valon määrään ja mittaustaajuutta nostettaessa myös valon intensiteettiä täytyi kasvattaa. Suurimmassa saavutettavassa mittaustaajuudessa oli anturien välillä selvä ero, sillä kolmiomittausanturi pystyi 392 kHz mittaustaajuuteen [28], kun konfokaalianturilla oli maksimissaan mahdollista mitata 2 kHz taajuudella ilman ulkoista valonlähdettä ja ulkoisen valonlähteen kanssa enintään 30 kHz taajuudella [29]. Kummallakin anturilla saavutettavat mittaustaajuudet olivat sovellukseen hyvin riittäviä, sillä useimmat pietsosähköiset toimilaiteet eivät pysty reagoimaan näin suurilla taajuuksilla tuleviin muutoksiin. Korkeasta mittaustaajuudesta oli kuitenkin hyötyä, jos käytetään usean arvon keskiarvotusta.

Kummankin anturin mittaustuloksissa oli mahdollista käyttää keskiarvotusta sekä suodatuksia kuten ali- ja ylipäästösuotimia. Konfokaalianturin suodatusmahdollisuudet olivat selvästi kolmiomittausanturia vastaavia monipuolisemmat, mutta kolmiomittausanturilla oli monipuolisemmin asetettavissa halutut ulostulot eli mitattava arvo. Kolmiomittausanturilla oli mahdollista mitata yhtä tai useampia pintoja kuten ensimmäistä tai kolmatta pintaa sekä eri pintojen välisiä erotuksia. Konfokaalianturilla pinnat valittiin näyttämällä joko ensimmäinen halutun raja-arvon ylittänyt pinta (takasin heijastuneen valon intensiteetti on riittävän voimakas), seurattiin selvimmin havaittavaa pintaa (takaisin heijastunut valo on voimakkainta) tai laskettiin kahden pinnan erotus. Useamman pinnan yhtäaikaista näyttämistä ei ollut käytetty ohjelmaversiossa IFC2401 Tool V0.66 –ohjelmalla mahdollista, vaan kerralla voitiin näyttää vain toista edellä mainituista pinnoista tai pintojen välistä erotusta. Pintojen erotuksessa konfokaalianturilla oli mahdollista asettaa mitattavan materiaalin taitekerroin, mikä mahdollistaa tulosten skaalauksen helposti sopivaksi.

Molemmilla antureilla oli mahdollista tarkastella vastaanotetun valon intensiteettikaavaa, minkä avulla pystyi arvioimaan pintojen erottumista. Konfokaalianturille oli tämän lisäksi mahdollista asettaa intensiteetille raja-arvo, jonka ylittyessä kohde tulkitettiin pinnaksi. Raja-arvomahdollisuus helpotti ei haluttujen pintojen ja häiriöiden rajaamista pois ja paransi mittauksien luotettavuutta.

4.1.4 Mittaukset

Mittauksien päätavoitteena oli selvittää kahden eri mittausperiaatteen soveltuminen tyypillisille työkappaleille. Soveltuvuutta arvioitiin seuraavilla kriteereillä:

- Anturin reagoiminen materiaalin tai mitattavien pintojen määrän muutokseen eli esimerkiksi siirryttäessä pelkän piin päältä lasin peittämän piin päälle
- Häiriöherkkyys mittauksien aikana
- Nopeuden vaikutus mittaustuloksiin

Anturien tarkkuutta oli testien perusteella hankala arvioida, koska testilaitteistossa ei ollut värähtelyiden vaimennusta eikä tilan lämpötilaa ollut säädelty. Näistä tekijöistä aiheutuvat häiriöt olivat merkittäviä, kun huomioidaan anturien korkea mittaustarkkuus. Toinen anturien tarkkuuden arviointia vaikeuttanut tekijä oli, että tyypillisistä työkappaleista, kuten piikiekoista tai lasilla päällystetystä piistä ei ollut mittauksia tehtäessä saatavilla pinnanprofiililtaan tarkasti tiedossa olevia kappeleita. Edellä mainitut asiat eivät kuitenkaan aiheuttaneet merkittävää häiriötä asetetuille mittausten päätaivoitteille tai soveltuvuuden kriteereille. Soveltuvuuden selvittämiseksi tehtiin kolme erilaista mittausta:

1. Piilevyn pinnan mittaus lasin alta ja ilman lasia, millä selvitettiin mittaustuloksen muuttumista läpinäkyvän aineen läpi mitattaessa.
2. Vastaavanlainen mittaus kuin ensimmäinen, mutta piilevyyn oli etsattu jyrkkäreunaisia altaita, joiden avulla voidaan arvioida äkillisten pinnan muutoksien vaikutusta mittaustuloksiin.
3. Neljän erilaisen kappaleen mittaus liikuttaessa 100 mm/s ja 1200 mm/s nopeuksilla, millä pyrittiin selvittämään nopeuden vaikutusta mittaustuloksiin ja anturien sopivuutta erilaisille mittaushetkille.

4.2 Ensimmäiset laitteistotestit

Testeissä liikutettiin kahta erilaista piilevyä, joista toiseen oli etsattu jyrkkäreunaisia altaita ja toinen oli tasainen levy, jota oli kallistettu. Piilevyä liikuttaessa pintaa mitattiin yläpuolelta anturilla, jonka mittaustuloksen perusteella ohjattiin pietsotoimilaitteen liikettä. Pietsotoimilaitteella saavutettu asema mitattiin interferometrin avulla. Eri testikohteilla pyrittiin selvittää järjestelmän käyttäytymistä kahdessa erityyppisessä tilanteessa: äkillisten pinnanmuutoksien ja tasaisesti muuttuvan pinnan tapauksessa. Testien tarkoituksena oli myös yleisellä tasolla arvioida onko toimintaperiaate käyttökelpoinen eli voidaanko pinnanmittauksen ja toimilaitteen aseman ohjauksen välillä käyttää vakioviivettä.

Korkeudensäätöjärjestelmä on ensisijaisesti suunniteltu pinnanlaadultaan hyvien ja kohutuullisen loivasti muuttuvien pintojen seurantaan, joita suuri osa käytännön sovelluskohteista edustaa. Äkillisten pinnanmuutoksien testaaminen oli kuitenkin tärkeää sillä niitä saattaa esiintyä osassa työstettävissä kappaleissa ja siirryttäessä työkappaleen päälle ja pois. Äkilliset pinnan muutokset ovat myös järjestelmän toiminnan kannalta hyvin haastavia, jolloin voidaan arvioida korkeudensäädön toimintaa ääritapauksissa.

Viivemekanismi suoritetuissa mittauksissa poikkesi hieman prototyypistä ja viive riippui käytetystä mittaustaajuudesta ja mitattavien arvojen määrästä kaavan 16 mukaisesti

$$t_d = \frac{x}{f}, \quad (\text{kaava 16})$$

jossa t_d on viive, x mitattavien arvojen määrä ja f mittaustaajuus. Prototyypin tavoin viivemekanismi oli epävakaa pienillä viiveen arvoilla. Edellä mainitut testien tavoitteet pystyttiin kuitenkin saavuttamaan riippumatta viiveen pituudesta.

4.3 Prototyyppi

Prototyypin testauksessa pyrittiin arvioimaan sekä yksittäisten komponenttien, että koko järjestelmän toimintaa. Yksittäisistä komponenteista arvioitiin anturin ja pietsotoimilaitteen tarkkuutta sekä pietsotoimilaitteen tapauksessa myös kykyä seurata annettua ohjausta. Järjestelmän muihin osiin kuuluu säädettävät tasot ja tukirakenteet, mistä arvioitiin säätöjen riittävyttä ja koko mekaanisen rakenteen tukevuutta ja jäykkyyttä.

Koko järjestelmän toimintaa testattaessa tarkasteltiin pietsotoimilaitteen ohjauksessa tapahtuvien äkillisten muutosten vaikutusta sekä eri työstönopeuksien vaikutusta pinnan seurantaan. Äkillisillä muutoksilla ohjauksessa pystyttiin arvioimaan pietsotoimilaitteen suorituskykyä ja säätimen parametrien toimivuutta. Nopeat toimilaitteen liikkeet toivat esiin myös helposti mahdolliset puutteet mekaanisen rakenteen tukevuudessa. Muutosta testattiin syöttämällä pietsotoimilaitteen ohjaukseen 1 Hz taajuista ja amplitudiltaan 100 μm liikettä vastaavaa kolmioaaltoa. Alkutilanteessa pietsotoimilaitteen asema poikkesi 100 μm ohjaussignaalista, minkä seurauksena pietsotoimilaitte pyrki mahdollisimman nopeasti korjaamaan aseman ohjaussignaalin mukaiseksi. Alussa tapahtuvasta nopeasta hyppäyksestä arvioitiin mahdollisesti aiheutuvan virheen suuruutta ja kestoa. Kuormana toimilaitteessa oli testin ajan 450 g painava linssi.

Työstönopeuden vaikutusta testattiin asettamalla linssin tilalle pietsotoimilaitteen mukana liikkuva konfokaalianturi mittaamaan kappaleen pintaan. Anturin paikka säädettiin niin, että mittaustuloksen ollessa arvossa 200 μm , anturin sijainti vastasi asemaa, jossa linssin polttopiste oli työkappaleen pinnassa. Mittausjärjestelyn avulla saatiin mitattua, miten hyvin polttopisteen sijainti pysyi kappaleen pinnassa testien aikana. Poikkeamat anturin asemasta 200 μm tarkoittivat, että myös lasersäde kohdistuisi väärälle korkeudelle kyseisessä kohdassa. Tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia siihen, että tilalla olisi käytetty anturin sijasta linssiä, sillä muissa testeissä linssi painoi 450 g ja nopeustesteissä anturi sekä kiinnitin yhteensä vain 140 g. Pietsotoimilaitteelle kohdistuva kevyempi kuorma pienentää liikevoimia ja vaikuttaa aseman säätöön.

Nopeustestit suoritettiin kolmella eri nopeudella (100 mm/s, 300 mm/s ja 1700 mm/s), ja mitattavana kohteena toimi kalteva 150 mm halkaisijaltaan oleva piilevy. Pietsotoimilaitteen asetusarvon ja mittaustuloksen välistä viivettä säädettiin nopeuden mukaan. Viivettä pienennettiin nopeuden kasvaessa ja nopeudella 1700 mm/s viive oli asetettu nolleen. Viiveen ollessa nolla syötettiin mittaustulos anturilta suoraan pietsotoimilaitteen säätimelle asetusarvoksi. Nopeuksien valintaa testejä varten rajoitti viivemekanismi

muuttuminen epävakaaksi pienillä viiveen arvoilla. Mittauksissa oli käytössä kummallakin konfokaalianturilla toiminto, joka säilyttää viimeisen saadun mittaustuloksen, jos anturi siirtyy esimerkiksi kappaleen päältä pois ja anturin mitta-alueella ei ole enää kohteita.

Pinnanseurantajärjestelmän toimivuutta arvioitiin myös työstettäessä laserilla piitä, terästä ja läpinäkyvää safiiria. Piihin ja teräkseen tehtiin 150 mm pitkiä työstöuria ja safiiriin 50mm pitkiä uria. Osassa testeissä työkappaletta oli tarkoituksella kallistettu hieman, jolloin pinnanvaihtelu koko kappaleen matkalla saattoi ylittää 300 μm :ä. Vaihtelu oli kuitenkin alle 400 μm , joka on anturin mitta-alue ja pietsotoimilaitteen liikealue. Teräkseen ja piihin työstettiin kappaleiden pintaan ja safiiriin kappaleen sisälle. Safiiria työstettäessä fokuskorkeus pyrittiin pitämään vakiomatkan verran työkappaleen pinnan alapuolella. Työstöjäljen hyvyyttä arvioitiin silmämääräisesti ja verrattiin samoilla parametreilla tehtyihin työstöihin, joissa ei ollut käytetty pinnanseurantaa. Safiiri halkaistiin työstöuraa pitkin, jolloin oli mahdollista mikroskoopilla nähdä työstöuran korkeus suhteessa työkappaleen yläpintaan. Testeissä käytetyn linssin numeerinen aukko oli 0,7 ja työstöprosessien arvioitiin aikaisempien testien pohjalta onnistuvan, kun laserin fokuskorkeuden vaihtelu pystyttiin pitämään noin $\pm 4 \mu\text{m}$ sisässä. Työstöt suoritettiin Corlasen X-LASE pulssilaserilla, jonka pulssin pituus on 10-30 ps ja keskiaallonpituus 1064 nm [30].

5 TULOSTEN TARKASTELU

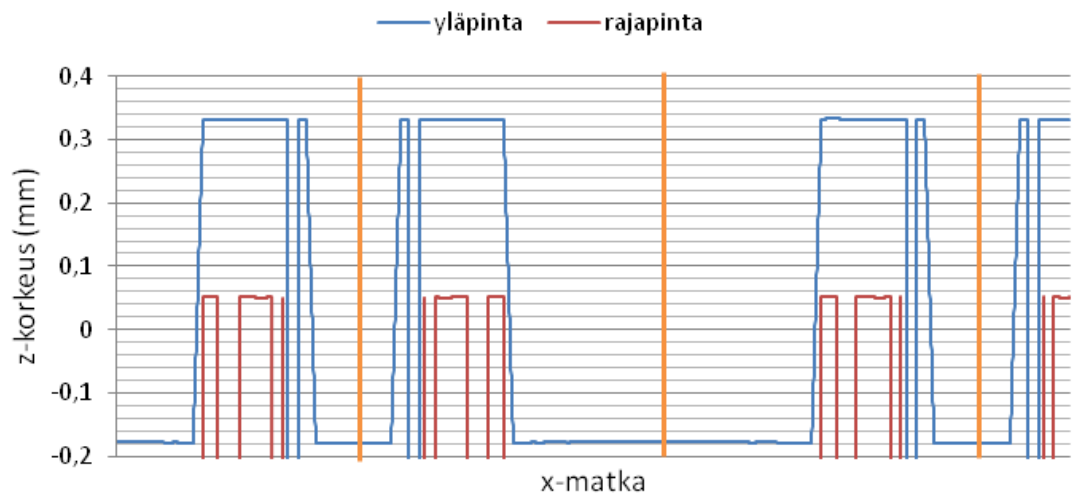
Testeissä saatiin tuloksia konfokaali- ja kolmiomittausanturin soveltuvuudesta tyypillisille työkappaleille, toimintaperiaatteen käyttökelpoisuudesta korkeudensäätöön ja prototyypin suorituskyvystä. Prototyypin testeissä kiinnitettiin huomiota erityisesti mekaanisen rakenteeseen, säätövaroihin ja yksittäisten komponenttien toimintaan. Prototyypin käyttäytymistä testattiin eri työstönopeuksilla ja verrattiin eroja korkeudensäädön kanssa ja ilman tehtyjen tösten välillä.

5.1 Anturit

Kolmiomittaukseen perustuvan anturin tulokset esitetään millimetreinä, jossa nolla-arvo vastaa anturin mittausalueen keskikohtaa. Anturin ohjain esitti arvona -999 lukeman, mikäli kohdetta ei pystytty mittaamaan. Mittaustaajuutena oli testeissä käytössä 5 kHz ja mittaustulosten esittämisessä käytettiin ensimmäisessä mittauksessa 256 mittauksen keskiarvoistusta ja toisessa ja kolmannessa mittauksessa neljän mittauksen keskiarvoistusta.

Konfokaalianturin mittaustulokset esitetään mikrometreinä ja nolla-arvo vastaa ylintä arvoa. Tätä suuremmat arvot ovat matalammalla eli anturin näyttämät tulokset ovat eri suuntaan kuin kolmiomittausanturin tulokset. Jos kohdetta ei pystytty mittaamaan, esitetään tulos arvona nolla. Käytetty mittaustaajuus kaikissa testeissä oli 1 kHz. Kaikki mittauksissa käytetyt näytteet ovat kuvattu luvussa 4.1.2.

Ensimmäisessä testissä anturien toimintaa arvioitiin mittaamalla näytettä 1 eli piitä, jonka päälle oli asetettu 500 µm paksuinen lasi. Näytteen pintaa mitattiin jatkuvasti ja x-akselia ajettiin edestakaisin 30 mm välistä matkaa. Käytetty liikenopeus oli 100 mm/s. Kuvassa 5.1 on esitetty kolmiomittausanturin tulokset. Pelkän piin pinnassa (kuvaajassa noin -0,18 mm korkeudella) ei esiinny mittauksessa häiriöitä ja mittaustulos on jatkuva koko matkan ajalta. Lasin päälle tultaessa on selvästi nähtävissä mittauksessa häiriöitä lasin yläpinnassa sekä lasin ja piin rajapinnassa. Häiriöiden sijainti suhteessa näytteen seen ei ole satunnaista, vaan häiriöt toistuvat aina samoissa kohdissa ja riippumatta liikesuunnasta. Lasissa olevat laserin jäljet voivat selittää osan häiriöistä, mutta etenkin toinen pinta näkyy laserin jälkien ulkopuolellakin heikosti. Usean näytteen keskiarvoistus saattaa aiheuttaa vaikutuksen näkymisen myös häiriökohtien ulkopuolelle sekä lasin jyrkkien reunojen muuttumisen hieman loivemmiksi. Samoilla parametreilla ajettaessa vastaavanlainen testi näytteelle 3 saatiin samankaltaiset tulokset, mutta häiriöt olivat huomattavasti vähäisemmät.



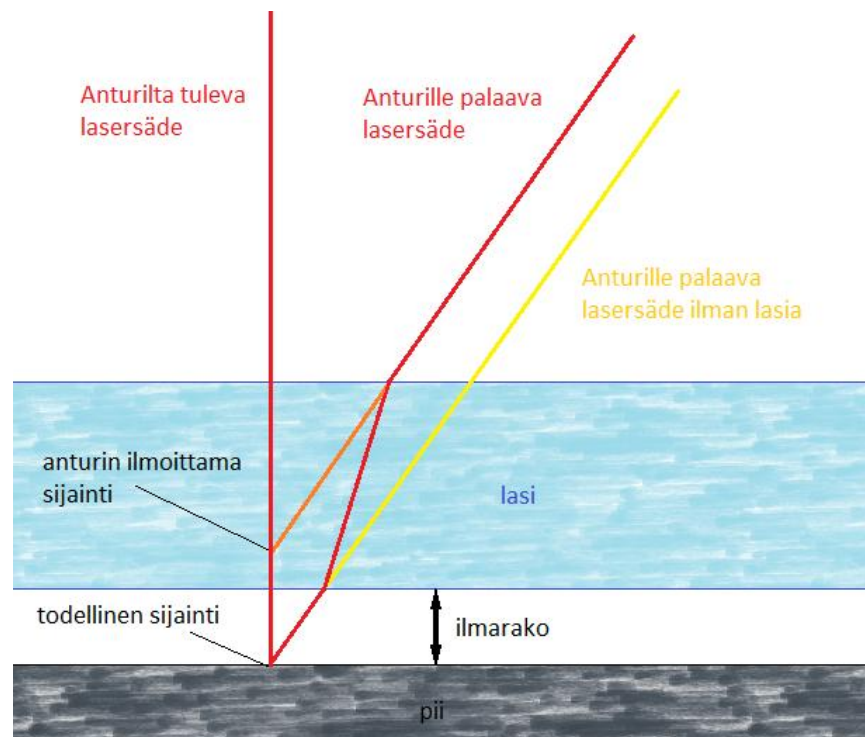
Kuva 5.1 Kolmiomittausanturin tulokset näytteelle 1. Mitattaessa on ajettu samaa väliä edestakaisin ja kääntymiskohdat ovat merkitty kuvaajaan oransseilla pystyviivoilla.

Konfokaalianturin tulokset vastaavassa testissä näkyvät kuvassa 5.2. Piin pinta on noin korkeudella 1200 μm ja lasin yläpinta on nähtävissä noin 700 μm korkeudella. Piin kohdalla selvimmin havaittava pinta ja yläpinta seuraavat ainoata havaittavissa olevaa pintaa eli piin yläpintaa. Lasin päälle siirryttäessä selvimmin havaittava pinta pysyy piissä, mutta ensimmäinen havaittava pinta siirtyy lasin yläpintaa. Ainoat havaittavat häiriöt mittauksissa esiintyivät lasin reunojen kohdalla, mikä on monille optisille antureille tyypillistä, koska lähes pystysuorilta pinnoilta valo ei heijastu takaisin anturille.



Kuva 5.2 Konfokaalianturin mittaustulokset näytteelle 1. Mitattaessa on ajettu samaa väliä edestakaisin ja kääntymiskohdat ovat merkitty kuvaajaan oransseilla pystyviivoilla.

Kummallakin anturilla on selvästi havaittavissa suuri hyppäys piin pinnan korkeudessa tultaessa lasin kohdalle. Vaikka piin pinta näytteessä on edelleen samalla korkeudella, mittaavat anturit pinnan sijainnin olevan todellista lähempänä lasin yläreunaa. Tämä on seurausta antureilta tulevan valon taittumisesta lasissa, joka on optisesti ilmaa tiheämpää materiaalia. Kuvassa 5.3 on havainnollistettu lasersäteen käyttäytyminen yksinkertaisessa tapauksessa, jossa lasersäde tulee tasaiseen lasilevyyn kohtisuorassa ja kohteesta sironnut valo taittuu matkalla takaisin anturille. Valo taittuu rajapinnassa sitä voimakkaammin, mitä suurempi aineiden välinen taitekertoimien ero on. Myös läpi mittaavan materiaalin paksuudella on merkitystä. Valo ehtii kulkea poikkeavassa kulmassa verrattuna valon reittiin pelkässä ilmassa sitä pidemmän matkan mitä paksumpi väliaine on.

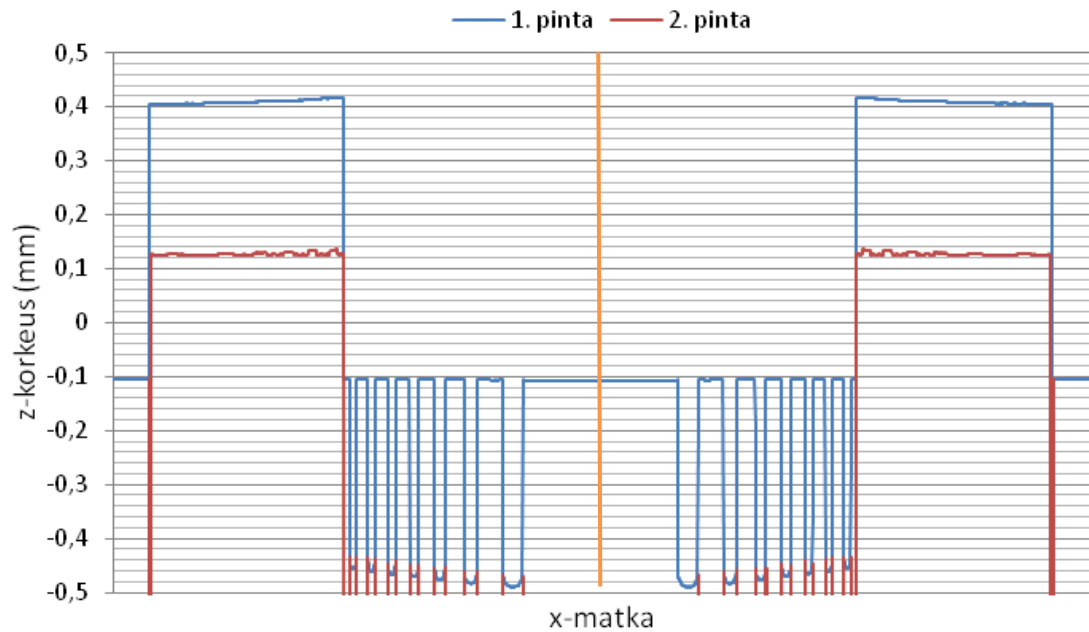


Kuva 5.3 Lasersäteen käyttäytyminen kolmiomittauksessa, kun kohdetta mitataan lasin läpi.

Toisessa testissä mitattiin näytettä 2 eli piilevyä, johon oli tehty etsaamalla nelikulmisiä altaita. Osa altaista oli peitetty 500 μm paksulla lasilla. Kuopat piissä mahdollistivat anturien toiminnan seuraamisen tilanteissa, jossa pinnassa on suuria äkillisiä vaihteluita. Näytteen avulla pystyttiin myös arvioimaan kumpaa pintaa anturi seuraa piin ja lasin rajapinnassa kuopan kohdalla: lasin alapintaa vai piin yläpintaa. Käytetty liikenopeus oli sama kuin edellisissä mittauksissa eli 100 mm/s.

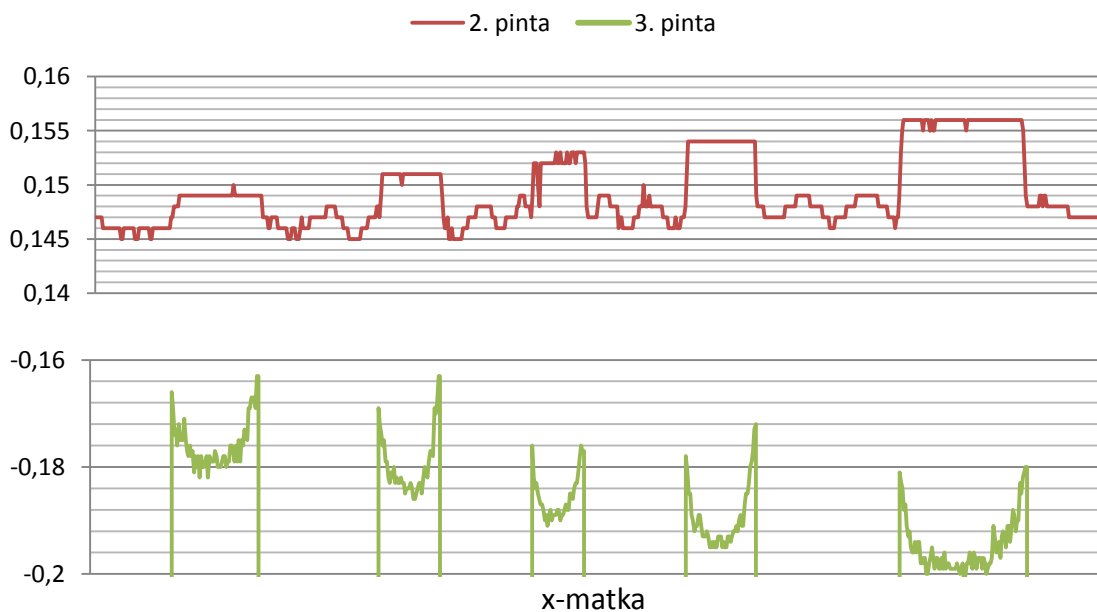
Toisen testin kolmiomittausanturin tulokset ovat kuvassa 5.4. Anturi seuraa hyvin yläpintaa riippumatta onko kyseessä piin sileä ja tasainen yläpinta (korkeudella -0,1 mm), lasin yläpinta (korkeudella 0,4 mm) tai hiomaton ja epätasainen etsattu allas piissä (korkeudella -0,45 mm). Piin ja lasin rajapinnassa (korkeudella 0,13 mm) on sen sijaan ha-

vaittavissa epätasaisuutta, jotka näkyvät kuvaajassa kanttimaisena aaltona, joka on voimakkaampaa lasin toisella reunalla.



Kuva 5.4 Kolmiomittausanturin tulokset näytteelle 2. Mittaus on suoritettu kahteen eri suuntaan ja kääntymiskohta on merkitty kuvaajaan oranssilla pystyviivalla.

Rajapinnan muutoksien tarkempaa havainnointia varten suoritettiin uusi mittaus, jossa mitattiin anturin edellisten kahden ensimmäisen löydetyn pinnan lisäksi myös kolmatta pintaa lasin alla. Toinen ja kolmas mitattu pinta on esitetty kuvassa 5.5.



Kuva 5.5 Kolmiomittausanturin mittaustulokset näytteelle 2. Kohdetta on mitattu vain lasin alueelta liikuttaessa yhteen suuntaan.

Kuvan 5.5 mittaustuloksista on selvästi havaittavissa yhteys toisen ja kolmannen pinnan välillä. Toinen pinta eli piin ja lasin rajapinta nousee aina kohdissa, joissa kolmas pinta saatiin mitattua eli etsattujen altaiden kohdalla. Huomionarvoista on myös, että kolmatta pintaa ei saatu mitattua muualla kuin altaiden kohdalla eli kapea ilmarako lasin ja piin välissä ei näy mittaustuloksissa suoraan. Ilmarako näkyy kuitenkin epäsuorasti mittauksissa, kun tarkastellaan toista pintaa. Altaiden kohdalla anturi mittaa rajapinnan korkeuden lasin alapinnan mukaan, mutta tultaessa kapean ilmaraon kohdalle anturi mittaa lasin alapinnan sijaan piin yläpintaa, josta valo heijastuu voimakkaammin.

Konfokaalianturilla ei ollut mahdollista saada luotettavasti vastaavanlaisia tuloksia kuin kolmiomittausanturilla rajallisten mittaustapojen vuoksi. Lasin alapintaa ei ollut mahdollista seurata, vaan ensimmäisen pinnan mittausta seuraa lasin yläpintaa ja selvimmän havaittavan pinnan mittausta piin pintaa. Piin pinnasta saadut mittaustulokset näkyvät kuvassa 5.6. Anturin mittaustuloksen rajausta ei auttanut pintojen erittelyssä. Ensimmäinen mitattava pinta oli sama riippumatta rajauksesta ja rajausta ainoastaan poisti rajojen ulkopuoliset tulokset. Lasien ylä- ja alapinnasta tulevat heijastukset olivat myös vahvuudeltaan samaa luokkaa, joten kynnyksarvon käyttäminen pintojen erittelyssä ei toiminut luotettavasti.



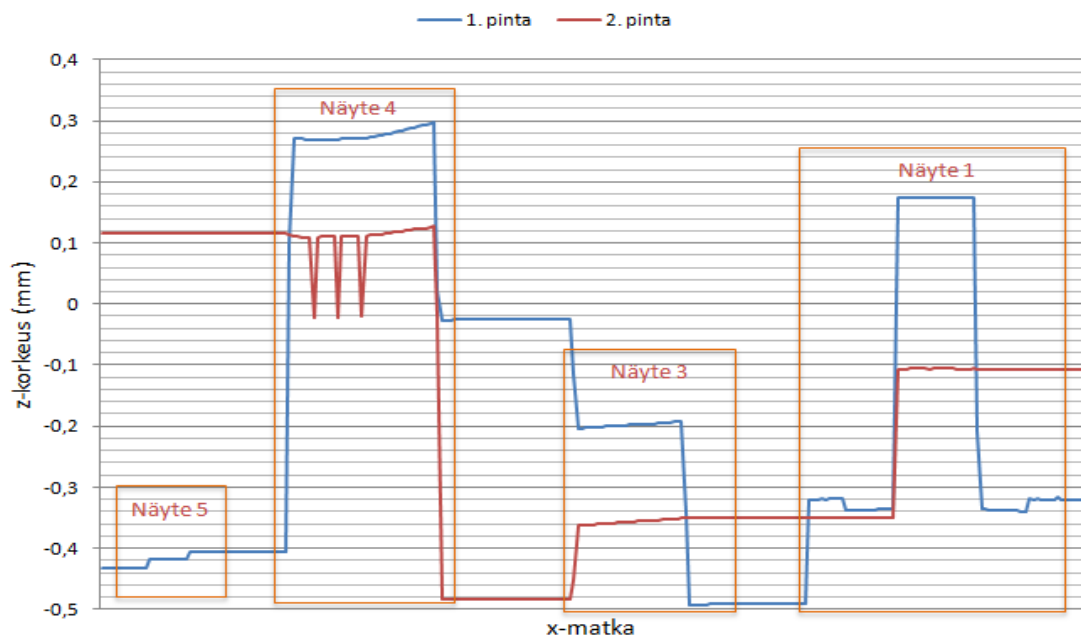
Kuva 5.6 Konfokaalianturin mittaustulokset näytteelle 2. Mittaus on suoritettu yhteen suuntaan.

Kuvan 5.6 tulokset ovat yhteneviä aikaisempien mittaustuloksien kanssa eli lasin kohdalla on nähtävissä selvä muutos piin yläpinnan muuttuessa korkeudelta 1820 µm korkeudelle 1780 µm. Jyrkkäreunaiset ja pohjaltaan pyöreät etsausjäljet ovat saatu mitattua tarkasti myös lasin läpi.

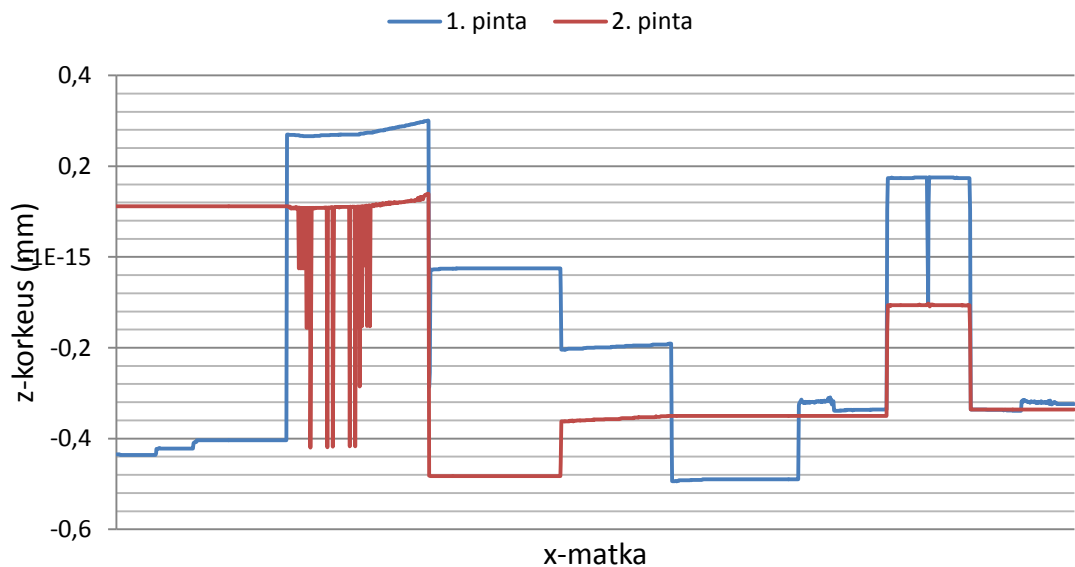
Kolmannessa testissä käytettiin mittauksissa liikenopeuksia 100 mm/s ja 1200 mm/s. Mittauskohteena oli neljä eri näytettä, jotka oli asetettu jonoon liikeakselin suuntaisesti, jolloin kaikki neljä voitiin mitata yhden liikkeen aikana. Näytteet olivat jonossa järjestyksessä 5, 4, 3 ja 1 eli suuria neliömäisiä kuoppia sisältävä piilevy, kaksi päällekkäin olevaa lasia ja kaksi viimeisintä kohdetta olivat piilevyjä joiden päällä on lasi. Molem-

mat anturit oli asetettu säilyttämään viimeinen mitattu tulos, jolloin esimerkiksi siirryttäessä kohteen reunan yli voi anturi joutua pois mitta-alueelta, mutta tällöin ei näytetä virhearvoa, vaan viimeisintä saatua mittaustulosta näytteen pinnasta.

Kuvissa 5.7 ja 5.8 näkyy kolmiomitta-anturin mittaustulokset 1200 mm/s ja 100 mm/s nopeuksilla. Mittaustulokset ovat hyvin samankaltaiset eri nopeuksilla muuten, mutta hitaammalla nopeudella saadaan pinnasta enemmän mittauspisteitä jolloin pinnanmuodot ja pienet yksityiskohdat tulevat paremmin esiin. Myös häiriöt tulevat selvemmin esiin hitaammalla liikenopeudella.

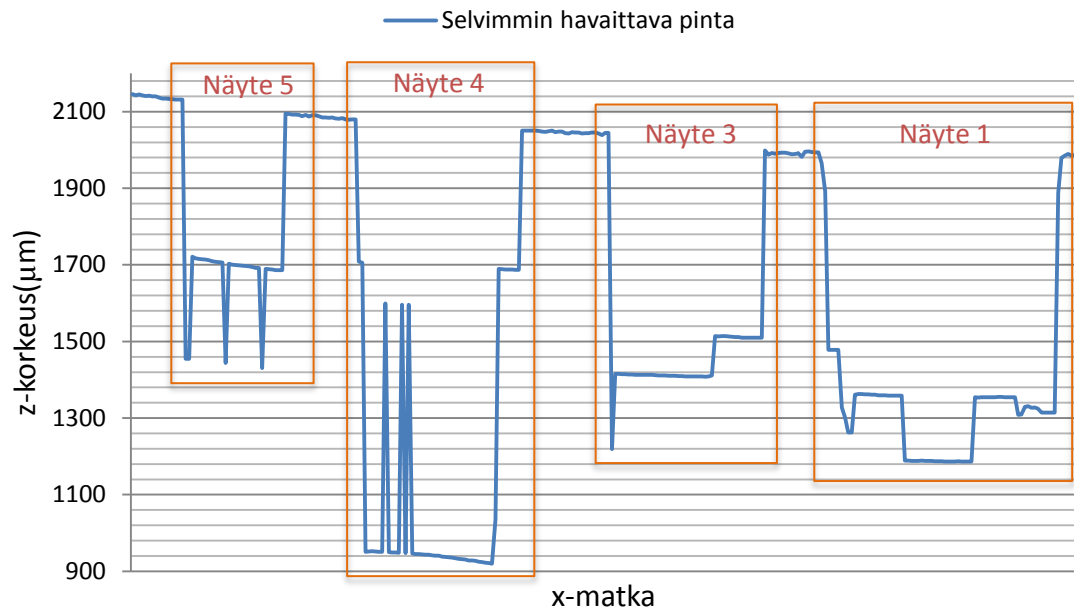


Kuva 5.7 Kolmiomitta-anturin tulokset näytteille 5, 4, 3 ja 1 liikenopeudella 1200 mm/s.

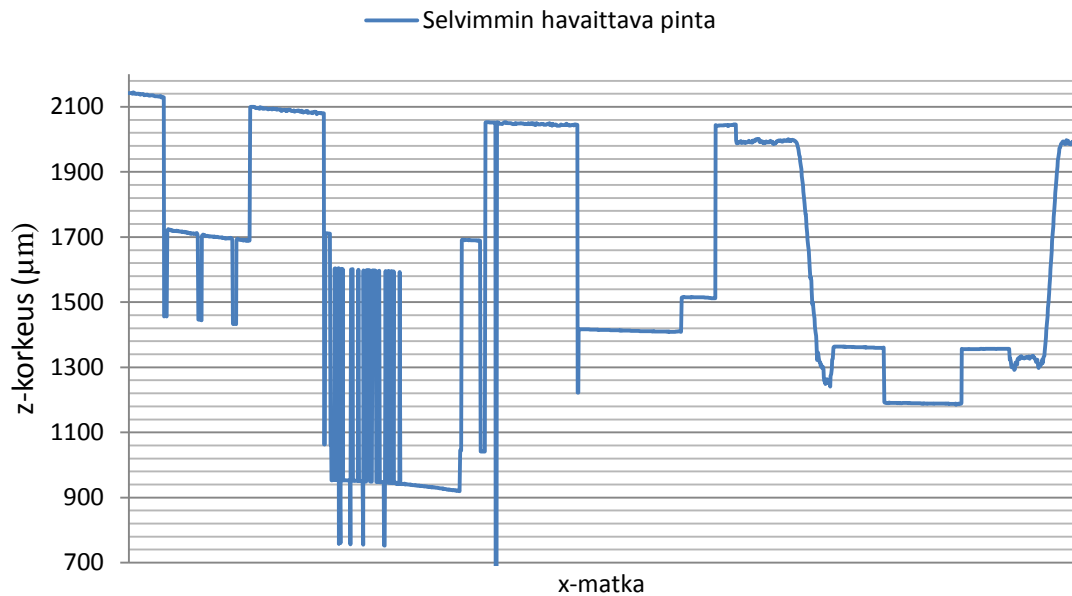


Kuva 5.8 Kolmiomitta-anturin tulokset näytteille 5, 4, 3 ja 1 liikenopeudella 100 mm/s.

Kuvissa 5.9 ja 5.10 näkyvät Konfokaalianturin tulokset, jotka näyttävät selvästi erilaisilta kuin kolmiomittausanturin tulokset johtuen anturin laajemmasta 3 mm mittausalueesta. Laajempi mittausalue mahdollistaa myös alimpien pintojen havainnoinnin, jolloin mittauskohteita kannatteleva levy näkyy myös tuloksissa ja yksittäisten mittauskohteiden erottaminen on helpompaa. Laajempaa mittausaluetta lukuun ottamatta tulokset ovat samankaltaiset kolmiomittausanturin kanssa.



Kuva 5.9 Konfokaalianturin mittaustulokset näytteille 5, 4, 3 ja 1 liikenopeudella 1200 mm/s.



Kuva 5.10 Konfokaalianturin mittaustulokset näytteille 5, 4, 3 ja 1 liikenopeudella 100 mm/s.

Kummankin anturin tulokset vastaavat hyvin todellisia pinnanmuotoja muutamia häiriökohtia lukuun ottamatta. Näytteessä 3 näkyy siihen kuulumaton nopea pinnan nousu vasemmassa reunassa sekä etenkin hitaalla nopeudella näytteissä 1 ja 4 näkyy teräviä häiriöpiikkejä laserilla työstettyjen urien kohdalla. Näytteessä 1 vasemmalla ja oikealla puolella näkyvät pienet kohoumat johtuvat kiinnitykseen käytetystä teipistä. Kolmiomittausanturilla alimmat pinnat eli näytteitä kannatteleva levy ja näytteen 5 etsattujen kuoppien alapinta eivät olleet anturin mittausalueella ja tästä johtuen eivät näy tuloksissa.

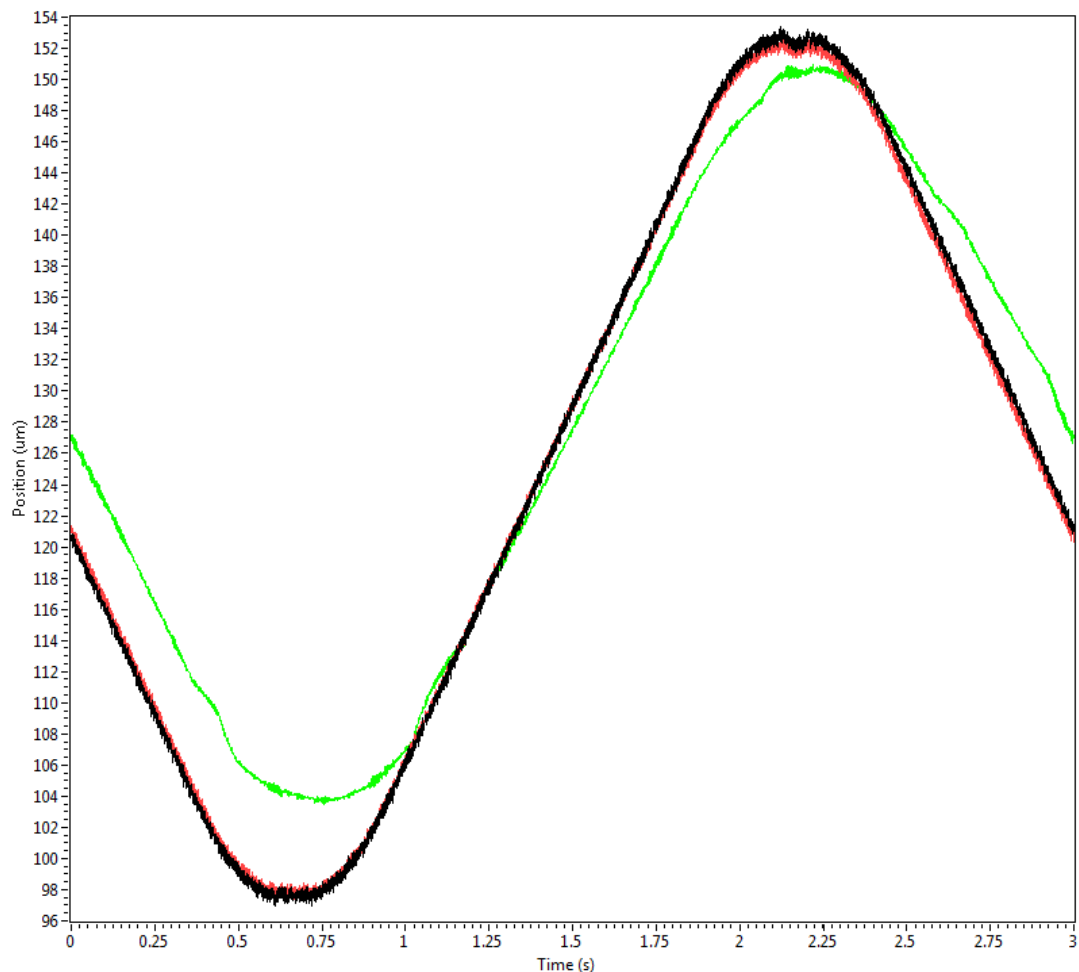
Kummatkin anturit pystyivät seuraamaan testeissä olleita pintoja, paitsi piin ja lasin rajapinnassa konfokaalianturi ei pystynyt seuraamaan lasin alapintaa, vaikka pintojen välissä olisi ollut selvä ilmarako. Konfokaalianturilla tämä oli kuitenkin seurausta ohjelmiston rajallisista säätömahdollisuuksista eikä mittauseräilyä tai anturin kyvystä mitata pintaa. Konfokaalianturilla mittaustulokset olivat hieman kolmiomittausanturia luotettavampia etenkin ensimmäisessä testissä, mutta muuten erot antureiden välillä eivät olleet suuria. Lasissa olleet laserin työstöjäljet näkyivät kummankin anturin mittaustuloksissa.

5.2 Ensimmäiset laitteistotestit

Testiajot suoritettiin kahdella erilaisella kappaleella: tasaisella kaltevalla piilevyllä ja piilevyllä, jossa oli jyrkkäreunaisia altaita. Liikenopeudet olivat molemmille kappaleille alhaiset. Tasaiselle piilevyllä käytettiin nopeutena 40 mm/s sekä 120 mm/s ja altaat sisältävälle piilevyllä nopeus oli 10 mm/s. Järjestelmän toimiessa ideaalisesti toimilaitteen asema seuraisi vakioviiveen jälkeen täsmällisesti samaa rataa kuin anturin tuottama työkappaleen pintaan perustuva rata. Jos toimilaitteen asema vakioviiveen jälkeen poikkeaa mittaustuloksesta, tarkoittaa tämä toimilaitteen aseman virheellistä sijaintia poikkeaman suuruuden verran. Käytännössä poikkeama vastaisi työkappaleen pinnalla laserin polttopisteen siirtymistä tavoitekorkeudelta liian alas tai ylös.

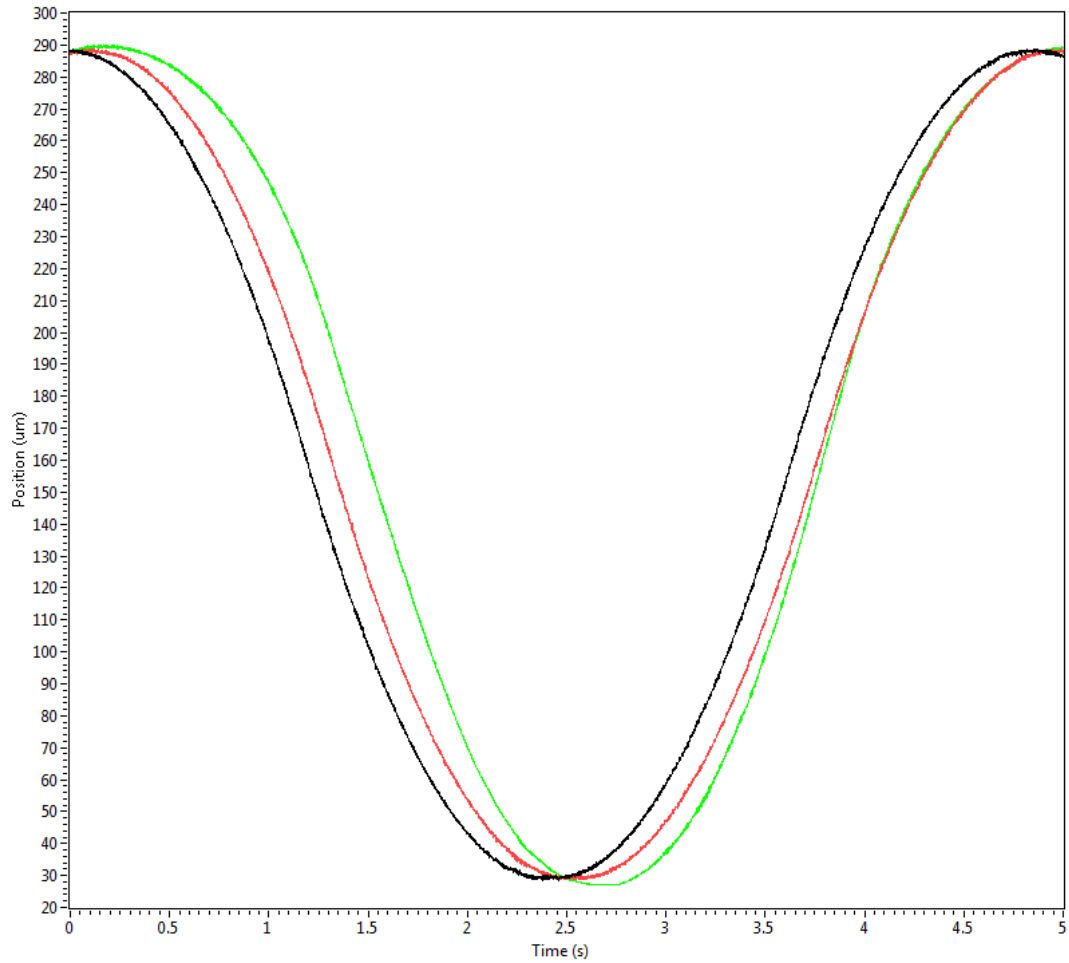
Tasaisesti muuttuvaa kaltevaa pintaa ajettiin edestakaisin kokoajan piin päällä pysyen nopeudella 40 mm/s. Tulokset ajoista on esitetty kuvassa 5.11. Toimilaitteen ohjaussignaali ja anturin mittaama pinta näyttävät lähes samanaikaisilta, mutta todellisuudessa ohjaussignaali tulee 3 s perässä ja käyrät osuvat kohdakkain pintaa edestakaisin ajattaessa. Kohdissa, joissa pinta muuttuu laskevasta nousevaksi tai nousevasta laskevaksi, toimilaite ei saavuta pinnan muotoja vastaavaa asemaa, vaan alkaa korjata toimilaitteen asemaa uuteen suuntaan jo ennen maksimi- tai minimikohdan saavuttamista. Näissä kohdissa toimilaitteen asemavirhe kasvaa, vaikka muutokset ovat kohtuullisen hitaita. Toimilaitteen liikkeissä on havaittavissa myös hystereesiä eli toimilaitteen asema muuttuu erilailla suhteessa ohjaukseen riippuen liikesuunnasta. Hystereesi on tyypillinen ilmiö pietsotoimilaitteille [22]. Hystereesin ja muiden ohjauksen epälineaarisuuksien

vuoksi toimilaitteen asema ei ole sama hyvin lineaarisesti muuttuvan anturin mittaustuloksien kanssa. Ohjauksen ja saavutetun aseman ero kasvoi myös testeissä käytettäessä suurempaa osaa toimilaitteen liikealueesta.



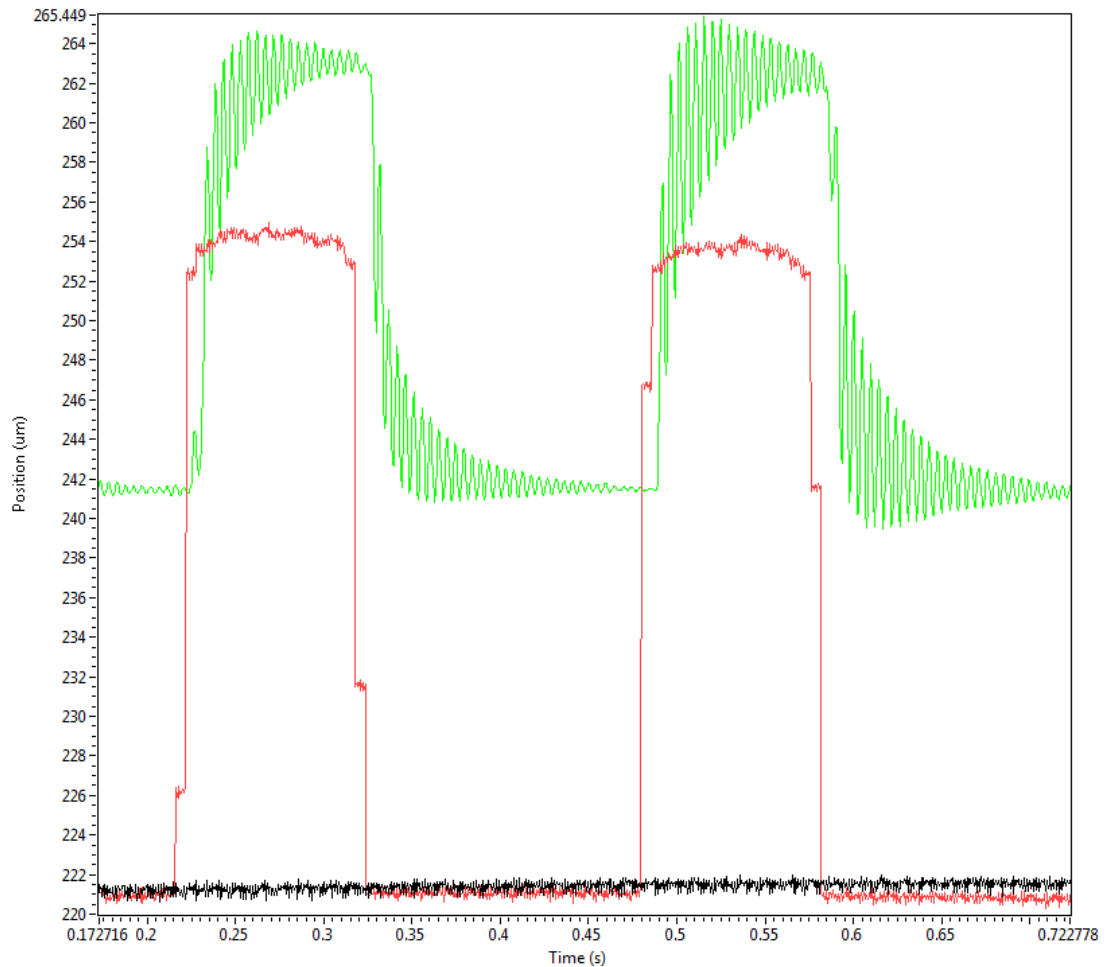
Kuva 5.11 Kaltevalla piilevyllä suoritettu järjestelmätesti, jossa näkyvät toimilaitteen asema (vihreä), toimilaitteen ohjaussignaali (punainen) ja anturin mittaama pinta (musta).

Kuvassa 5.12 on nähtävissä tulokset ajettaessa muutetuilla ohjauksen parametreilla 120 mm/s nopeudella kaltevan piilevyn päällä. Muuttamalla hieman ohjausjännitteen offset-komponenttia ja mittaustuloksen skaalausta saatiin toimilaitteen asema parhaimmillaan pidettyä kohtuullisen lähellä haluttua asemaa koko toimilaitteen liikealueella. Tuloksissa on silti nähtävissä hystereesin vaikutus voimakkaana liikesuunnan vaihtuessa, joka vaikuttaa merkittävästi järjestelmän tarkkuuteen. Skaalauksen avulla on saatu suunnanmuutoksissa tapahtuva asetusarvosta jääminen pois liioittelemalla toimilaitteen liikettä suhteessa mittaustulokseen, mutta haittapuolena on heikentynyt tarkkuus tasaisesti kasvavan tai laskevan liikkeen aikana jolloin toimilaitteen asema muuttuu liian jyrkästi.



Kuva 5.12 Kaltevalla piilevyllä tehty testi ohjausjännitteen skaalauksen jälkeen. Kuvassa näkyvät toimilaitteen asema (vihreä), toimilaitteen ohjaussignaali (punainen) ja an-turin mittaama pinta (musta).

Jyrkkäreunaisten kuoppien kohdalla toimilaitteen käyttäytyminen muuttui selvästi, kuten kuvasta 5.13 voidaan havaita. Käytössä oli suurempi offset-jännite toimilaitteen ohjauksessa, minkä johdosta toimilaitteen asema oli ylempänä suhteessa toimilaitteen ohjaukseen. Merkittävin ero näkyy toimilaitteen hyvin voimakkaana värähtelynä nopeiden muutoksien kohdalla. Värähtely vaimeni ohjauksen muuttuessa tasaisemmaksi, mutta värähtelyn vaikutus näkyy suhteellisen pitkään toimilaitteen aseman heilumisena.



Kuva 5.13 Jyrkkiä pinnanmuutoksia sisältävällä piillä suorittu järjestelmätesti, jossa näkyvät toimilaitteen asema (vihreä), toimilaitteen ohjaussignaali (punainen) ja anturin mittaama pinta (musta).

Kokonaisuutena testeistä voidaan todeta, että viiveeseen perustuva ohjaustapa toimi hyvin, sillä järjestelmä käyttäytyi samaa liikesarjaa toistettaessa ennalta arvattavasti ja toistettavuus oli hyvä. Toimilaitteen asema seurasi pintaa kohtuullisella tarkkuudella, mutta epälineaarisuudet, hystereesi ja hitaus suunnanvaihdoksissa aiheuttivat merkittävää epätarkkuutta. Käytetyn pietsotoimilaitteen ominaisuudet eivät olleet riittävät ja pinnanseurantajärjestelmällä tavoiteltavaan tarkkuuteen vaadittaisiin ominaisuuksiltaan selvästi parempi toimilaite.

5.3 Prototyyppi

5.3.1 Mekaaninen rakenne ja säätövarat

Prototyyppiä suunniteltaessa kiinnitettiin erityistä huomiota säätövarojen riittävyyteen. Asennus ja käyttöönottovaiheessa testattiin säätöjen riittävyys sekä liikematkan että tarkkuuden suhteen. Lasersäteen linjausta varten oli mikroruuveilla säädettävä XY-taso ja kumpaakin pinnanmittausanturia varten omat XYZ-tasot. Tasojen liikealueet olivat

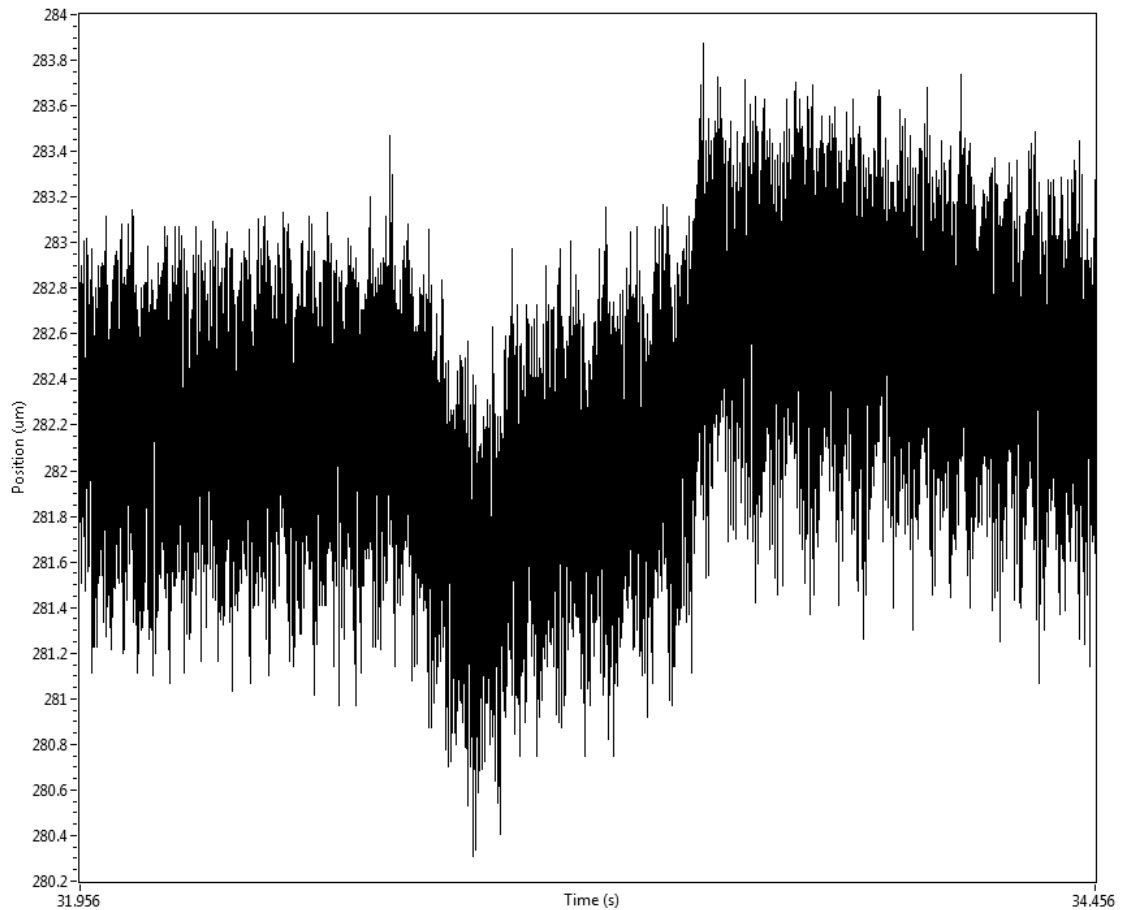
XY-tasolla 13 mm ja antureiden tasoilla 6 mm jokaiseen liikesuuntaan. Liikealueet riittivät hyvin laitteiston asennuksessa ja mahdollistivat lasersäteen nopean linjauksen sekä anturien paikan asettamisen tarkasti samalle linjalle lasersäteen kulkureitille. Anturien Z-suuntainen säätö helpotti huomattavasti anturien asettamista oikealle korkeudelle suhteessa työstökorkeuteen. Pienemmätkin liikealueet olisivat riittäneet käytännön tarpeisiin ja noin 2 mm liikealue olisi ollut kaikille tasoille riittävä. Tasojen lukitukset varmistivat säädetyn paikan säilymisen. Mikroruuvien avulla paikka pystyttiin asettamaan noin mikrometrin tarkkuudella, mikä oli laserin linjaukseen ja anturien paikan säätämiseen riittävä.

Mekaanisten rakenteiden jäykkyys osoittautui käytännön testeissä riittämättömäksi. Pietsotoimilaitteen tuottamat suuret kiihtyvyydet yhdistettynä kuormana olevan linssin noin 450 g painoon aiheuttivat tukirakenteissa värinää. Alumiinilevy, johon oli kiinnitetty sekä anturien XYZ-tasot että pietsotoimilaite, alkoi osassa testeissä täristä linssin liikkeen voimasta. Tämän seurauksena polttopisteen korkeus suhteessa työstöpintaan vaihteli ja anturien mittaustuloksiin tuli pietsotoimilaitteen liikettä mukailevia häiriöitä. Anturien mittaustuloksen vaihtelu aiheutti vastavuoroisesti äkillisiä muutoksia pietsotoimilaitteen ohjaukseen, mikä kasvatti pietsotoimilaitteen liikkeitä entisestään. Ilman mittauksen keskiarvoistusta olikin jossain tapauksissa nähtävissä järjestelmän muuttuminen erittäin epävakaaksi johtuen anturin mittaustuloksien ja pietsotoimilaitteen liikkeen välisestä vuorovaikutuksesta.

5.3.2 Toimilaite ja anturit

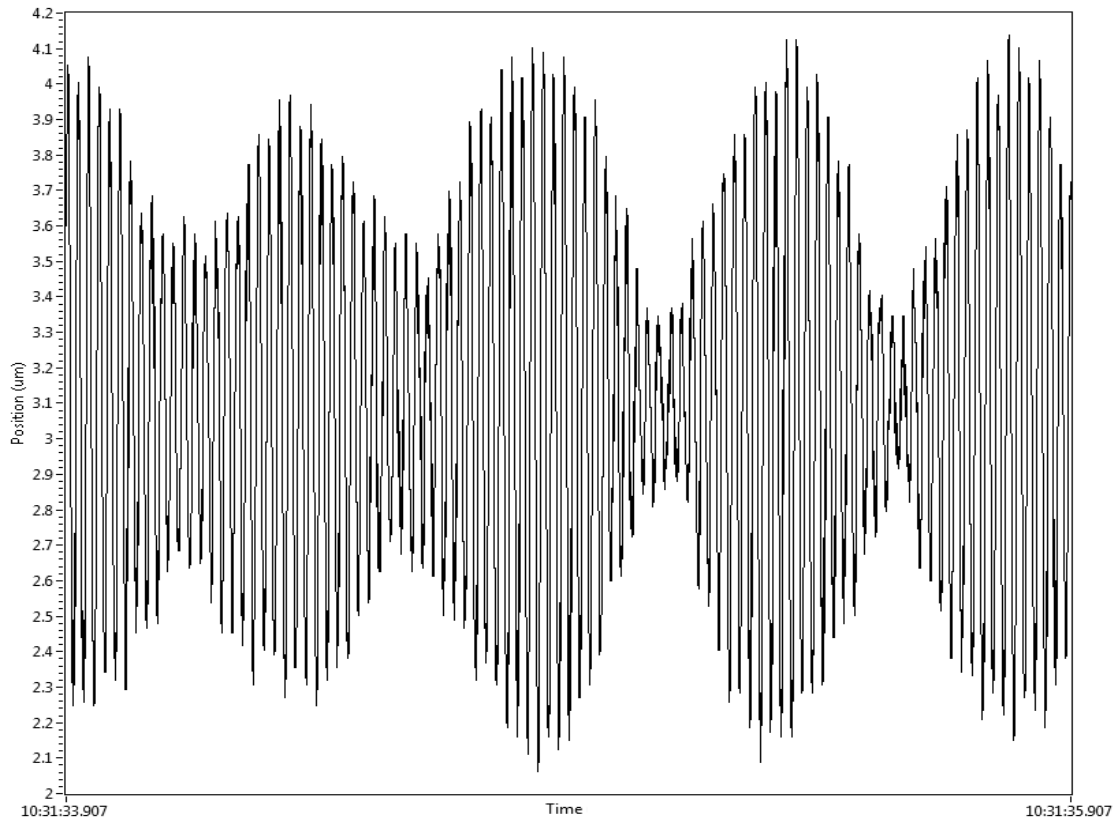
Järjestelmän yksittäisissä komponenteissa oli havaittavissa myös selvää epävakautta sekä häiriöitä. Konfokaalianturi ja pietsotoimilaite eivät saavuttaneet valmistajan määrittelemiä suoritusarvoja, joissa konfokaalianturille luvattiin 16 nm resoluutio [29] ja pietsotoimilaitteelle PI-säätäjän kanssa 1,24 nm resoluutio [31]. Useiden satojen nanometrien heiluntaa oli nähtävissä sekä toimilaitteen asemassa että anturin mittaustuloksessa.

Anturin mittaustulos vaihteli, vaikka mittauskohde ja anturi olivat kummatkin paikallaan. Ympäristön värinä voi aiheuttaa heiluntaa, mutta mittaustulokseen ei ollut suurta vaikutusta kiinnityspaikalla tai tavalla. Anturin parametrien kuten mittaustaajuuden muutoksella sekä mitattavalla materiaalilla näytti olevan vaikutusta mittaustarkkuuteen, mutta parhaimmillaankin anturin heilunta oli useita satoja nanometrejä ja huonoimmillaan vaihteluväli oli noin kolmen mikrometrin luokassa. Kuvassa 5.14 on esitettynä anturin mittaustuloksen vaihtelu testeissä suurimmillaan mitattaessa analogiasignaalia ilman mitään suodatuksia. Mittaustulos vaihteli myös anturin ollessa pois mittausalueelta, jolloin anturin pitäisi näyttää nolla-arvoa. Mittaustuloksen vaihtelussa ei ollut eroa käytettäessä analogiasignaalia ja mitattaessa tulos NI 6120 -kortin avulla tai käytettäessä valmistajan omaa mittaushjelmaa ja luettaessa digitaalisesti siirretty mittaustulosdata.



Kuva 5.14 Anturin mittaustuloksen vaihtelu suurimmillaan.

Pietsotoimilaitteella heilunta oli tyypillisesti anturia selvästi voimakkaampaa käytettäessä 450 g painavaa linssiä. Vaihteluväli toimilaitteen sijainnille asetusarvon pysyessä vakiona oli jopa kahden mikrometrin luokkaa. Värähtelytaajuus toimilaitteella oli 50 Hz, mikä viittaisi sähköiseen häiriöön. Toimilaitteen värähtely on esitetty kuvassa 5.15, jossa on myös nähtävissä värähtelyn jaksollisuus. Värähtelyn voimakkuus kasvoi ja vaimeni jaksollisesti toimilaitteen ohjaussignaalin pysyessä vakiona. Värähtely ei muuttunut annettaessa asetusarvo analogisessa tai digitaalisesti muodossa ohjaimelle, eikä muutosta värähtelyyn saatu aikaa sammuttamalla tai käynnistämällä lähellä olevia sähköisiä laitteita.

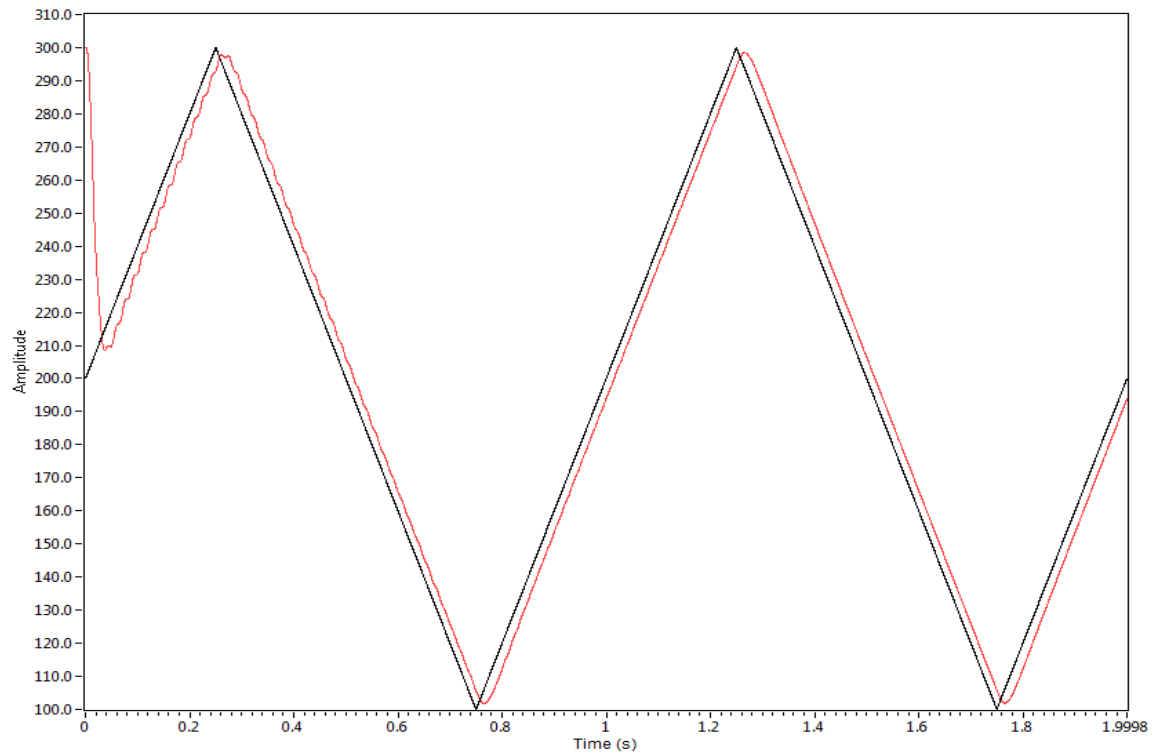


Kuva 5.15 Pietsotoimilaitteen liike ohjaussignaalin pysyessä muuttumattomana.

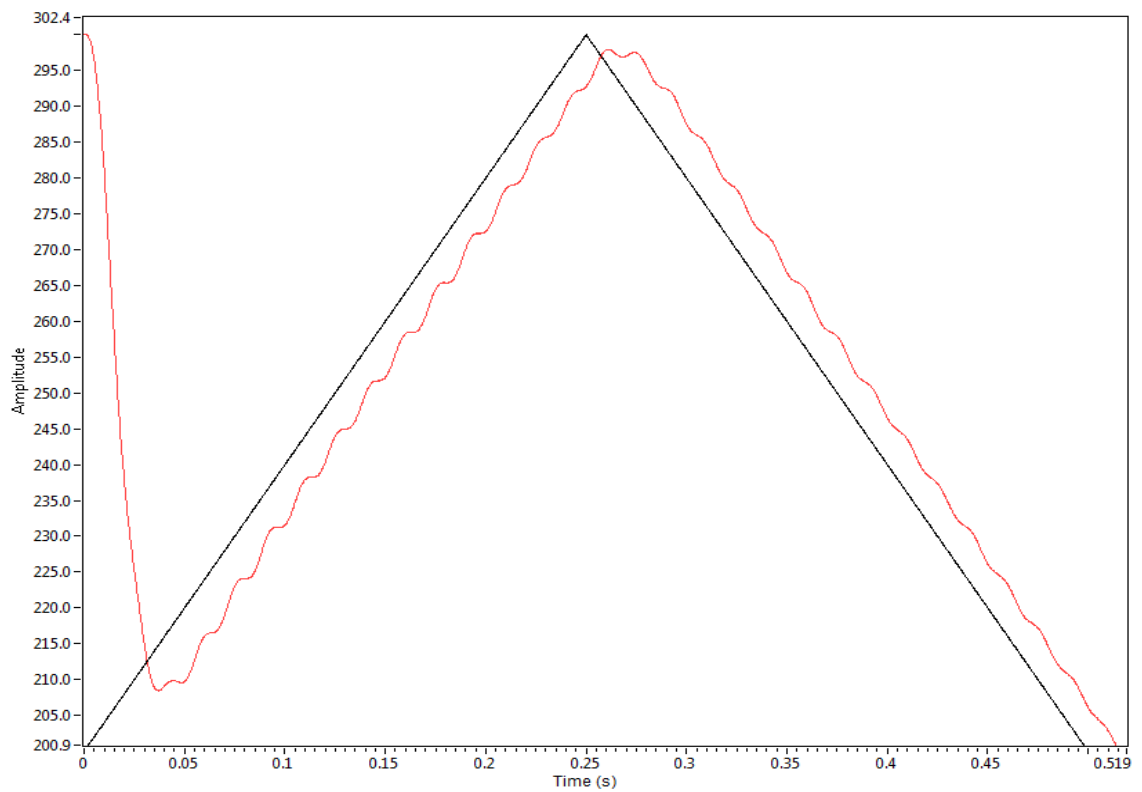
Pietsotoimilaitteen vakauteen vaikuttivat myös resonanssitaajuus ja P- ja I-parametrien asetukset. Toimilaitteen joutumista resonanssitaajuuteen pyrittiin välttämään asettamalla ohjaimen kaistanestosuodin estämään resonanssitaajuus. Asetettaessa kaistanestosuodin poistamaan lähellä 50 Hz olevat taajuudet saatiin toimilaitteen heiluntaa hieman vähennettyä, mutta ero ei ollut kovin merkittävä. Toimilaitteessa oli myös havaittavissa pientä hidastumista korkeampien taajuuksien jäädessä pois. Toimilaitteen ja ohjaimen vaihtumisen jälkeen huollon yhteydessä oli kaistanpäästösuotimen asetuksilla huomattavasti suurempi merkitys. Säätimen P- ja I-parametrit oli viritetty uudelleen huollon yhteydessä ja toimilaitteen käyttäytyminen oli hyvin epävakaa. Värähtelytaajuus oli edelleen 50 Hz, mutta värähtelyn amplitudi oli selvästi suurempi. Laskemalla kaistanestosuotimen alarajaa 70 Hz arvosta 44 Hz asti, saatiin kuitenkin toimilaitteen käyttäytyminen huomattavan paljon vakaammaksi ja aseman vaihteluväli laskemaan noin 400 nm luokkaan.

Pietsotoimilaitteen ohjausta muutettaessa äkillisesti kesti toimilaitteella lyhyt aika saavuttaa uusi asema. Etenkin suurien useiden kymmenien tai satojen mikrometrien muutoksien tapauksessa aiheutui tavoitearvon ylitys ja toimilaitteen asemassa huojuntaa suhteessa asetusarvoon. Huojunnan vaikutus näkyi suhteellisen pitkän aikaa, tyypillisesti useiden satojen millisekuntien ajan, vielä äkillisen muutoksen jälkeenkin. Kuvassa 5.16 pietsotoimilaitetta ohjattiin kolmioaallolla ja liikkeen alussa toimilaitteen asema poikkesi tavoitearvosta 100 µm verran. Alussa tapahtuvan nopean hyppäyksen vaikutus näkyi noin 500 ms ajan, jolloin toimilaitteen asema heilui huomattavan paljon. Heilunta

on esitetty tarkemmin kuvassa 5.17. Toimilaitteen liike oli huomattavasti tasaisempi kolmioaallon seuraavassa jaksossa, jossa sama liike toistui ilman heiluntaa.



Kuva 5.16 Pietsotoimilaitteen reagointi ohjauksessa tapahtuvaan äkilliseen muutokseen. Ohjaussignaali: musta, toimilaitteen asema: punainen.



Kuva 5.17 Pietsotoimilaitteen heilunta äkillisen ohjauksen muutoksen jälkeen. Ohjaussignaali: musta, toimilaitteen asema: punainen.

Testeissä työstökappaleen reunalle saapuminen aiheutti usein äkillisen muutoksen mitaustuloksessa ja sitä kautta myös toimilaitteen ohjauksessa. Työstömatkat olivat lyhyitä suhteessa korkeaan liikenopeuteen ja työstöliike kesti tyypillisesti enintään muutamia satoja millisekunteja. Tästä johtuen työstöliikkeen alussa tapahtuva äkillinen muutos aiheutti jossain testityöstöissä heiluntaa jopa koko työstöliikkeen ajaksi. Alussa tapahtuvaan tavoiteaseman saavuttamiseen ja sitä seuraavaan lyhytkestoiseen ylitykseen kuluva aika johtaa työstöjäljen heikkenemiseen etenkin työstöliikkeen alkuosassa.

Äkillisten muutosten yhteydessä tapahtuvaa ylitystä voidaan pienentää muuttamalla pietsotoimilaitteen PI-säätäjän parametreja, mutta tämän seurauksena pietsotoimilaite saattaa reagoida hitaammin asetusarvon muutoksiin ja saavuttaa hitaammin halutun aseman. Työkappaleen ulkopuolelle siirryttäessä tai muissa tilanteissa, jossa anturi siirtyy pois mitta-alueelta, on hyödyllistä, että anturi näyttää asemaksi viimeistä mitattua arvoa. Tällöin esimerkiksi useita koko työkappaleen mittaisia uria lähekkäin työstettäessä jää työstöliikkeen lopuksi voimaan viimeinen korkeusarvo poistuttaessa kappaleen pinnalta. Seuraavaan uran alussa toimilaite on jo uran alussa lähes oikealla korkeudella, sillä kappaleen pinta ei kahden lähekkäin olevan uran välissä ehdi muuttua paljon ja uran alun äkillinen hyppäys jää pieneksi. Anturin ohjaimeen oli suoraan rakennettu viimeisen arvon säilytys anturin poistuessa mitta-alueelta, mutta analogiaulostulon kanssa viimeistä arvoa oli mahdollista pitää vain rajatun aikaa ennen kuin anturi siirtyi näyttämään nolla-asemaa. Arvon säilyttämisen aika riippui siten asetettujen arvojen määrästä ja mittaustaajuudesta. Mikäli jouduttiin käyttämään pitkäkestoisia kiihdytys- ja jarrutus-aikoja tai työstöliikkeiden välillä oli muista syistä normaaleja pidempiä odotusaikoja, saattoi anturi hukata viimeisen mitatun aseman ennen kuin anturi uudelleen pääsi työstökappaleen yläpuolelle.

5.3.3 Nopeustestit

Korkeudenseurantajärjestelmän suorituskykyä testattiin kolmella eri työstönopeudella. Testeissä käytettiin linssiin sijaan toista konfokaalianuria työstökorkeuden määrittämiseen. Mittaustulokset ovat nähtävissä liitteessä 2. Liitteessä 2 vihreällä värillä näkyy linssin kohdalla tapahtuvat muutokset pinnassa, punaisella pietsotoimilaitteen asema ja mustalla etukäteen mitattu työkappaleen pinta. Kuvaajissa on esitetty yleiskuva mittaustuloksista sekä tarkennettu kuva linssin kohdalla tapahtuvista pinnan vaihteluista.

Mittaustuloksien perusteella voidaan sanoa, että nopeudella ei ole järjestelmän suorituskyvyn kannalta suurta merkitystä ja tulokset näyttäisivät jopa paranevan nopeuden kasvaessa. Maksimi- ja minimiarvon välinen vaihteluväli kullakin nopeudella on esitetty taulukossa 5.1. Etenkin hitailla nopeuksilla on nähtävissä piikit anturin saapuessa piilevyn päälle ja poistuttaessa piilevyn päältä, mikä on seurausta piilevyn hieman pyöreistä reunoista. Reunojen pyöreystestä johtuvaa virhettä ei ole laskettu mukaan vaihteluväliin. Korkeimmalla 1700 mm/s nopeudella on hankala arvioida loppuosan laskusta, mikä

osuus on reunan pyöreystä johtuvaa ja mikä jo ennen reunaa tapahtuvaa paikoitusvirhettä. Loppuosaa ei ollut huomioitu vaihteluväliin, mikä saattaa antaa tuloksista todellista paremman kuvan.

Taulukko 5.1 Pinnan vaihtelu linssin kohdalla eri nopeuksilla.

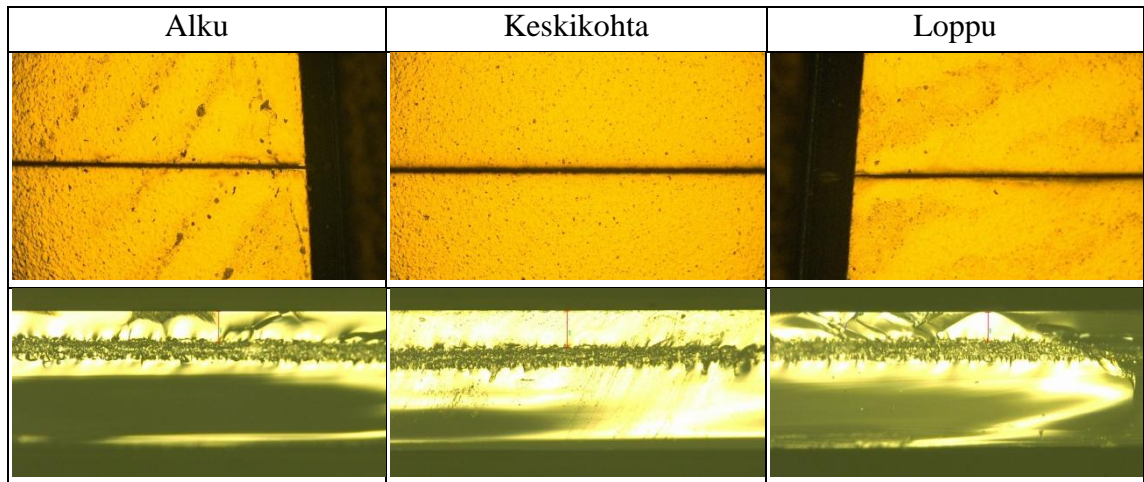
Nopeus (mm/s)	100	300	1700
Vaihteluväli (µm)	13	12	8

Testeissä käytetyssä piilevyssä oli myös alkupäässä jyrkkäreunainen painauma, joka näkyy selvästi pintaa etukäteen mitattaessa. Pietsotoimilaite ei pysty seuraamaan hitaimmallakaan 100 mm/s nopeudella jyrkkäreunaista muotoa täsmällisesti, vaan pietsotoimilaitteen liikkeet ovat pyöristetympiä ja rauhallisempia. Ilmiö korostuu etenkin korkeilla liikenopeuksilla. Painauman kohdalla on kaikilla nopeuksilla huomattavissa selvä paikoitusvirheen kasvu. Pietsotoimilaitteen epävakaas on nähtävissä myös kaikilla nopeuksilla pieniamplitudisena selvästi alle mikrometrin suuruisena aaltoiluna.

5.3.4 Materiaalintyöstö

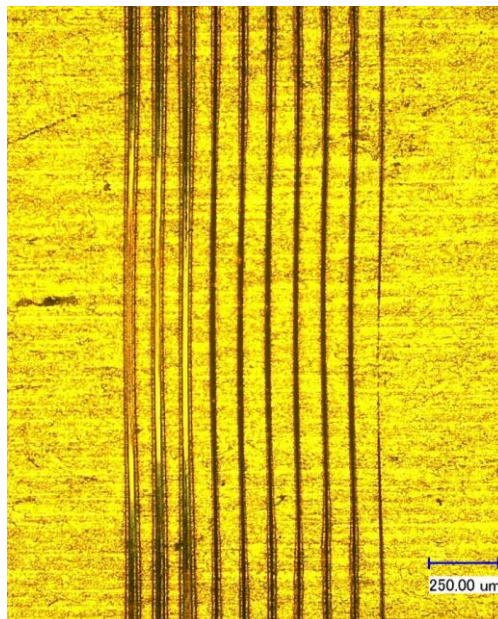
Korkeudensäätöjärjestelmällä tehtiin myös alustavia materiaalityöstötestejä. Työstettäviä materiaaleja olivat teräs, pii ja safiiri. Teräkseen ja piihin työstettiin uria kappaleen pintaan ja safiiriin materiaalin sisään. Työkappaleita tarkoituksella kallistettaessa oli huomattavissa hyvin selvä ero korkeudensäädöllä ja ilman valmistettujen urien välillä. Ilman korkeudensäätöä laser pystyi työstämään piitä ja terästä vain hyvin pieneltä matkalta johtuen suuresta pinnanvaihtelusta suhteessa laserin kapeaan syväterävyysalueeseen. Läpinäkyvää safiiria työstettäessä työstökohta vaihteli huomattavasti siirtyen pinnan yläpuolelta safiirin sisään ja lopulta niin syvälle safiiriin, että safiiriin ei muodostunut enää työstöjälkeä. Kaikki työstöprosessit epäonnistuivat ilman korkeudensäätöä, mutta toisaalta työkappaleiden useiden satojen mikrometrien pinnanvaihtelu oli epätavallisen suuri verrattuna kyseisten materiaalien normaaliin mikrotyöstöprosessiin.

Korkeudensäätöä käytettäessä työstö onnistui kallistettuihin kappaleisiin koko työstömatkalta. Poikkeuksena oli työkappaleen reunan läheinen alue tapauksissa, jossa mittausarvon säilytystä ei käytetty anturin joutuessa pois mitta-alueelta. Tällöin työkappaleen reunasta johtuva äkillinen muutos aiheutti hetkellisesti väärän korkeuden ja työstön epäonnistumisen reuna-alueen läheisyydessä. Piihin ja safiiriin tehdyistä työstöistä on kuvassa 5.18 nähtävissä kolmesta eri paikasta (työstöuran alusta, keskeltä ja lopusta) otetut kuvat. Piistä otetut kuvat ovat työkappaleen pinnasta ja safiirista otetut kuvat ovat työstöjäljestä safiirin sisällä. Safiiri halkaistiin työstöuraa pitkin kuvien ottamista varten.



Kuva 5.18 Kallistettuihin pii- ja safiirilevyihin tehdyt työstöt korkeudensäätöä käyttäen.

Piihin ja teräkseen tehdyissä urissa oli nähtävissä aaltomaisia työstöjäljen vaihteluita. Vaihtelu teräksessä on esitetty kuvassa 5.19. Työstöjäljen voimistuminen ja heikkeneminen jaksottaisesti on seurausta fokuskorkeuden pienistä vaihteluista työstön aikana. Nopeustestien tulokset ovat yhteneviä työstökokeisiin ja liitteessä 2 on myös kaikilla nopeuksilla havaittavissa muutaman mikrometrin aaltomaista vaihtelua fokuskorkeudessa. Safiirin sisään työstettäessä oli myös nähtävissä aaltomaista vaihtelua, jossa työstöjälki vaihteli eri syvyydellä suhteessa safiiriin yläpintaan. Työstönopeudella ei ollut selvää vaikutusta työstöjälkeen. Kuvassa 5.18 ei piissä ole nähtävissä aaltomaisia vaihteluita, mikä johtui useamman kuin yhden työstön tekemisestä samaa uraa pitkin. Tämän seurauksena työstöjäljen vaihtelut tasoittuivat.



Kuva 5.19 Työstöjäljen vaihtelu teräksessä käytettäessä korkeuden seuranta. Käytettyä laserin tehoa on laskettu siirryttäessä urissa vasemmalta oikealle.

Työstettäessä ilman kallistuksia samoja materiaaleja erot työstöjäljessä korkeudensäädön kanssa tai ilman olivat pienempiä mutta silti selvät. Ilman korkeudensäätöä pinnanvaihtelultaan tasaisempaan piihin saatiin työstöprosessi onnistumaan pidemmältä matkalta kuin teräkseen, mutta kumpaankaan ei saatu prosessia onnistumaan koko 150 mm työstömatkalla. Pinnanvaihtelut olivat piissä ja teräksessä laserin syväterävyysaluetta suurempia, minkä johdosta prosessi saatiin onnistumaan vain kohdissa, joiden sijainti oli lähellä muuttumattomana pysyvää fokuskorkeutta. Safiirin työstäminen onnistui materiaalin sisään koko 50 mm työstömatkalle, mutta työstökorkeus suhteessa kappaleen yläpintaan ei pysynyt vakiona.

Korkeudensäätöä käytettäessä tulokset olivat samankaltaiset kallistetuilla ja kallistamattomilla työkappaleilla. Työstöprosessi onnistui kohtuullisen hyvin koko työstömatkalta, mutta laadussa oli nähtävissä edelleen aaltomaisia vaihteluita. Verrattuna ilman korkeudensäätöä tehtyyn työstöön etuna oli kohtuullinen työstöjälki koko matkalla työkappaleen pinnavaihteluista huolimatta. Toisaalta ilman korkeudensäätöä saatiin kapealla alueella parempia tuloksia aaltoliikkeen puuttuessa.

6 YHTEENVETO

Työssä kehitettiin toimiva prototyyppi lasersäteen fokuspisteen korkeudensäätöön. Prototyypin rakentamista varten testattiin työkappaleen pinnan mittaukseen kolmio- ja konfokaalimittauksen soveltuvuutta. Konfokaalimittausperiaate osoittautui testien perusteella luotettavammaksi vaihtoehdoksi tyypillisille työkappaleille, mutta kolmiomittaukseen perustuva anturi suoriutui myös testeistä suhteellisen hyvin ja olisi mahdollinen vaihtoehto käytettäväksi pinnan mittaukseen. Ennen prototyypin rakentamista testattiin yleisellä tasolla korkeudensäätöjärjestelmän toimintaperiaatetta eli mittaustuloksen käyttämistä viiveen jälkeen toimilaitteen ohjauksessa. Toimintaperiaate osoittautui testeissä hyvin soveltuvaksi korkeudensäätöön. Linssin asemaa säätävälle pietsotoimilaitteelle havaittiin selvä tarve paikkatakaisinkytkennälle riittävän tarkkuuden saavuttamiseksi. Toimilaitteen viive annetusta asetusarvosta paikan saavuttamiseen pysyi myös lähes vakiona, mikä mahdollistaa tarkan ennakoitavuuden ja on edellytys toimintaperiaatteen käytölle.

Prototyypin testeissä korkeudensäätöjärjestelmä pystyi seuraamaan työkappaleen pintaa vähintään $\pm 6,5 \mu\text{m}$ tarkkuudella käytettäessä alhaisimmillaan 100 mm/s ja suurimmillaan 1700 mm/s nopeuksia. Prototyypillä korkeussuuntainen liikealue on 400 μm , mikä ylittäviä työkappaleen pinnan vaihteluita ei voida enää seurata. Korkeudensäätöjärjestelmän liikealuetta rajoittavat pietsotoimilaitteen liikealue ja anturien mitta-alueet. Liike- ja mitta-alueita kasvattamalla saadaan seurattua suurempia pinnan vaihteluita, mutta anturien mittaustarkkuus ja pietsotoimilaitteen dynamiikka saattavat samalla heikentyä. Työstön aikana mittaus suoritetaan etukäteen pisteestä, johon lasersäde myöhemmin saapuu. Tämä rajoittaa työstöradat suoriin viivoihin ja kasvattaa myös työstöaikoja verrattuna ilman korkeudensäätöä suoritettavaan työstöön. Mittauksesta aiheutuva lisäaika ei ole riippuvainen työstömatkasta, vaan anturien ja linssin välisestä etäisyydestä sekä käytetystä nopeudesta.

Käytettäessä prototyyppiä työstöprosesseissa, jotka vaativat fokuspisteen pysymisen noin $\pm 4 \mu\text{m}$ sisässä suhteessa työkappaleen pintaan, oli havaittavissa selvä parannus prosessin onnistumisessa verrattuna ilman korkeudensäätöä suoritettuun työstöön. Työkappaleiden pinnanvaihtelun ollessa 50 - 400 μm saatiin prosessi onnistumaan kohtuullisesti koko työkappaleen alueella, kun ilman korkeudensäätöä prosessi onnistui vain hyvin pienellä alueella. Tyypillisissä työstökohteissa, kuten piikiekoissa, korkeudenvaihtelut ovat usein alle 50 μm , mutta myös pienemmillä pinnanvaihteluilla prosessi saatiin onnistumaan laajemmalla alueella käyttämällä korkeudensäätöä.

Työstölaadun kannalta suurimmaksi ongelmaksi testeissä osoittautui aaltomainen korkeudenvaihtelu. Keskimääräisesti fokuskorkeus pystyttiin pitämään lähellä tavoiteltavaa arvoa, mutta koko työstömatkan alueelta oli nähtävissä aaltomainen vaihtelu korkeudessa, minkä vuoksi fokuskorkeus oli sykleittäin hieman liian alhaalla tai ylhäällä. Aaltoilevaan liikkeeseen vaikuttivat ainakin yksittäisten komponenttien eli konfokaalianturien ja pietsotoimilaitteen epävakaus ja järjestelmän tukirakenteiden riittämätön jäykkyys. Myös hyvin nopeat työkappaleen pinnanvaihtelut aiheuttivat korkeudensäädössä virhetä vielä pitkään äkillisten muutoksien jälkeenkin. Työkappaleen reunoilta poistuttaessa ja saavuttaessa takaisin on äkillisten muutoksien välttämiseksi tärkeää säilyttää viimeinen pinnasta saatu mittaustulos ja toimilaitteen asema.

Esitetty korkeudensäätötapa sopii parhaiten prosesseille, joissa laserin syväterävyysalue on kapea, suoria työstöratoja monipuolisempia muotoja ei vaadita, työstöpinta-ala on laaja ja käytetään suuria liikenopeuksia. Tällöin mittaustavan rajoituksilla työstöratoihin ei ole merkitystä ja nopeuden sekä työstömatkojen ollessa suuria mittauksesta aiheutuva työstöajan kasvu jää suhteellisen pieneksi. Suurilla työstöpinnoilla myös työkappaleen pinnanvaihtelut ovat usein hyvin vaikea pitää pieninä, jolloin tarve korkeudensäätöön kasvaa. Sovellusalue sopii hyvin yhteen teollisuuden pyrkimyksien kanssa kasvattaa työkappaleiden kokoa ja työstönopeuksia, mikä mahdollistaa korkeamman tuottavuuden.

Korkeudensäätöjärjestelmän jatkokehityksessä ja tutkimuksessa on pyrittävä vähentämään aaltomaisia fokuskorkeuden vaihteluita. Vaihteluiden minimoimiseksi tarvitaan jäykemmät tukirakenteet ja on löydettävä syyt, jotka aiheuttivat pietsotoimilaitteen ja anturien toimimisen selvästi valmistajan suoritusarvoja heikommin. Lisäksi mittaustuloksen ja toimilaitteen ohjauksen välistä viivettä säätävää järjestelmää on syytä kehittää vakaammaksi alle 40 ms arvoilla, mikä tarjoaisi laajemman työstönopeusalueen. Prototyypistä puuttui myös rajapinta työaseman ohjauksen ja korkeudensäätöjärjestelmän väliltä, mikä mahdollistaisi kahdesta anturista oikean valitsemisen liikesuunnan mukaan ja viiveen suuruuden muokkaamisen työstönopeuden mukaan.

LÄHTEET

- [1] Wan, D., Liang, X., Meng, F., Hu, D., Wang, Y., Chen, B. & Shao, Y. Automatic compensation of laser beam focusing parameters for flying optics. *Optics & Laser Technology* 41(2009)4. pp. 499-503.
- [2] Bardin, F., Cobo, A., Lopez-Higuera, J.M., Collin, O., Aubry, P., Dubois, T., Högrström, M., Nylén, P., Jonsson, P., Jones, J.D.C. & Hand, D.P. Closed-loop power and focus control of laser welding for full-penetration monitoring. *Applied Optics* 44(2005)1. pp. 13-21.
- [3] Santos, A., Ortiz de Solórzano, Vaquero, J. J., Peña, J.M., Malpica, N. & Del Pozo, F. Evaluation of autofocus functions in molecular cytogenetic analysis. *Journal of Microscopy* 188(1997)3. pp. 449-454.
- [4] Song, Y., Li, M. & Lining, S. A New Auto-focusing Algorithm for Optical Microscope Based Automated System. *Control, Automation, Robotics and Vision, 2006. ICARV '06. 9th International Conference on. Singapore, December 5-8, 2006.* pp. 1-5.
- [5] Hsu, W.Y., Lee, C.S., Chen, P.J., Chen, N.-T., Chen, F.-Z., Yu, Z.-R., Kuo, C.-H. & Hwang, C.-H. Development of the fast astigmatic auto-focus microscope system. *Measurement Science and Technology* 20(2009)4.
- [6] Pat. US 7,345,814. Microscope system and microscope focus maintaining device for the same. Olympus Corporation, Tokyo. (Yoneyama, T., Tsuchiya, A. & Koyama, K.). Appl. No 10/951,175. September 27, 2004. (March 18. 2008). 45 s.
- [7] Kujanpää, V., Salminen, A. & Vihinen, J. Lasertyöstö. Tampere 2005. Teknologiaeollisuus. 373 s.
- [8] Ion, J.C. Laser processing of engineering materials. 2005. Butterworth-Heinemann. 556 s.
- [9] Pham, D.T., Dimov, S.S., Ji, C., Petkov, P.V. & Dobrev, T. Laser milling as a 'rapid' micromanufacturing process. Part B Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, *Journal of Engineering Manufacture*. 218(2004)1, pp. 1-7.
- [10] Eugene, H. Optics. 4th ed. San Francisco 2002, Pearson Education. 698 s.
- [11] Judd, S. Photoelectric sensors and controls: selection and application. 1988. CRC Press. pp. 29.

- [12] Menn, N. Practical Optics. 2004. Elsevier. 336 s.
- [13] Ready, J. Industrial Applications of Lasers. 2nd ed. 1997. Academic Press. 599 s.
- [14] Boltryk, P.J., Hill, M., McBride, J.W. & Nascè A. A comparison of precision optical displacement sensors for the 3D measurement of complex surface profiles. Sensors and Actuators A 142(2008)1, pp. 2-11
- [15] Qin, Y. Micromanufacturing Engineering and Technology. 2010. Elsevier. 432 s.
- [16] Pique, A & Chrisey, D. Direct-Write Technologies for Rapid Prototyping. 2001. Elsevier. 726 s.
- [17] Franssila, S. Introduction to Microfabrication. 2004. Wiley. 402 s.
- [18] Renishaw. PLE fibre optic laser encoder manual. 2005
- [19] Micro-Epsilon. optoNCDT 2401/2402 manual. 2010
- [20] Smith, W. J. Modern Optical Engineering. New York. 2007. McGraw-Hill. pp. 83-84.
- [21] Zhang, P. Industrial Control Technology. 2008. William Andrew. 900 s.
- [22] Uchino, K. & Giniewicz, J. R. Micromechatronics. New York 2003. Marcel Dekker. 489 s.
- [23] PI Ceramic. Piezo Tutorial. 2010. [verkkodokumentti]. [viitattu 26.7.2011]. Saatavissa: http://www.piceramic.com/piezo_tutorial.php
- [24] Tian, Y., Shirinzadeh, B., Zhang, D. & Alici, G. Development and dynamic modelling of a flexure-based Scott-Russell mechanism for nano-manipulation. Mechanical Systems and Signal Processing. 23(2009)3, pp. 957-978.
- [25] Renishaw. PLE fibre optic laser encoder manual. 2005
- [26] National Instruments. NI 6115/6120 User Manual. 2003
- [27] National Instruments. NI 660x User Manual. 2009
- [28] Keyence Corporation. Ultra High-Speed/High-Accuracy Laser Displacement Sensors LK-G5000 Series. 2010. [verkkodokumentti]. [viitattu 11.4.2011]. Saatavissa: http://www.keyence.co.uk/dwn/lkg5000_ku.pdf

[29] Micro-Epsilon. Confocal chromatic displacement sensors. [verkkodokumentti]. [viitattu 11.4.2011]. Saatavissa: <http://www.micro-epsilon.com/download/products/cat--optoNCDT-24xx-confocal--en.pdf>

[30] Corelase OY. X-LASE Data sheet. [verkkodokumentti]. [viitattu 29.3.2011]. Saatavissa: http://www.corelase.fi/fileadmin/user_upload/Products/x_lase_A4_eng_2505_lr.pdf

[31] Physik Instrumente. P-725 PIFOC Long-Travel Objective Scanner. [verkkodokumentti]. [viitattu 28.11.2011]. Saatavissa: <http://www.physikinstrumente.com/en/products/prdetail.php?sortnr=200375>

LIITE 1: LIIKENOPEUDEN JA –MATKAN VAIKUTUS TYÖSTÖAIKoihin

Liikenoisuus muuttuu

Liikematka ilman mittausta:	0,150 m
Kiihtyvyyt:	20 m/s ²
Liikematka mittauksen kanssa:	0,210 m
Anturin ja lasersäteen välinen etäisyys:	0,03 m

nopeus (m/s)	Ajat ilman mittausta			Ajat mittauksen kanssa			muutos (%)
	t _a (s)	t _{ura} (s)	t _{kok} (s)	t _a (s)	t _{ura} (s)	t _{kok} (s)	
2	0,200	0,075	0,275	0,200	0,105	0,305	10,9
1,8	0,180	0,083	0,263	0,180	0,117	0,297	12,7
1,6	0,160	0,094	0,254	0,160	0,131	0,291	14,8
1,4	0,140	0,107	0,247	0,140	0,150	0,290	17,3
1,2	0,120	0,125	0,245	0,120	0,175	0,295	20,4
1	0,100	0,150	0,250	0,100	0,210	0,310	24,0
0,8	0,080	0,188	0,268	0,080	0,263	0,343	28,0
0,6	0,060	0,250	0,310	0,060	0,350	0,410	32,3
0,4	0,040	0,375	0,415	0,040	0,525	0,565	36,1
0,2	0,020	0,750	0,770	0,020	1,050	1,070	39,0
0,1	0,010	1,500	1,510	0,010	2,100	2,110	39,7

Työstöuran pituus muuttuu

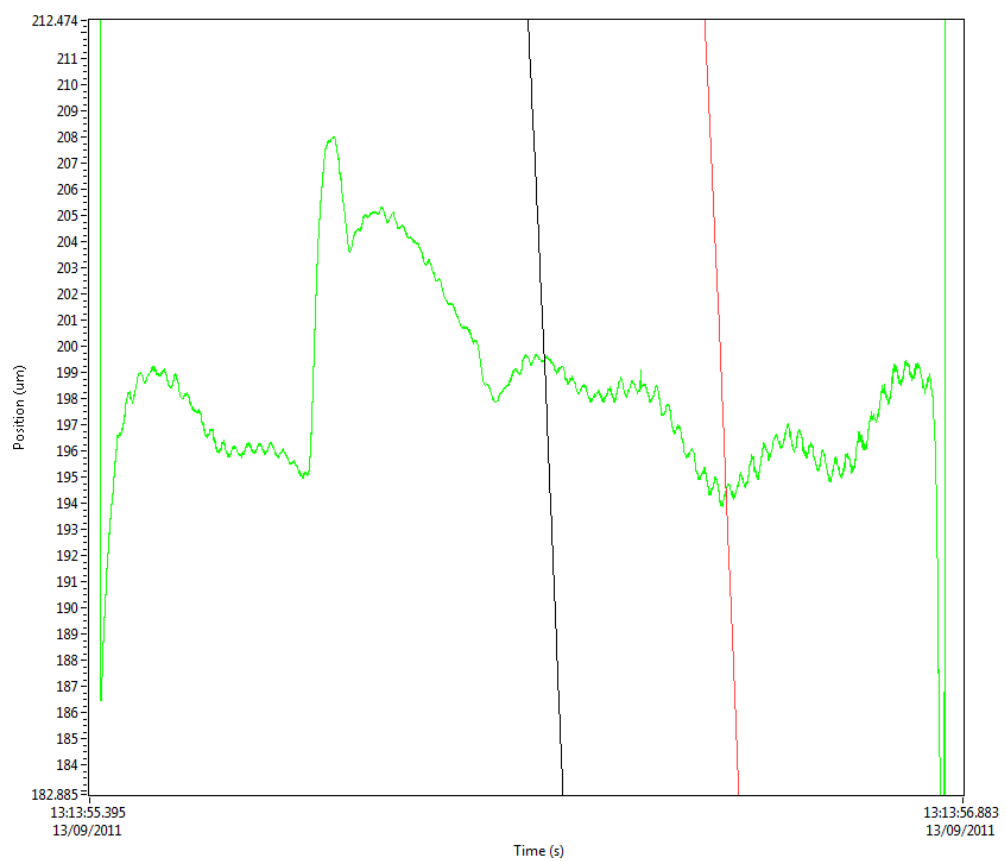
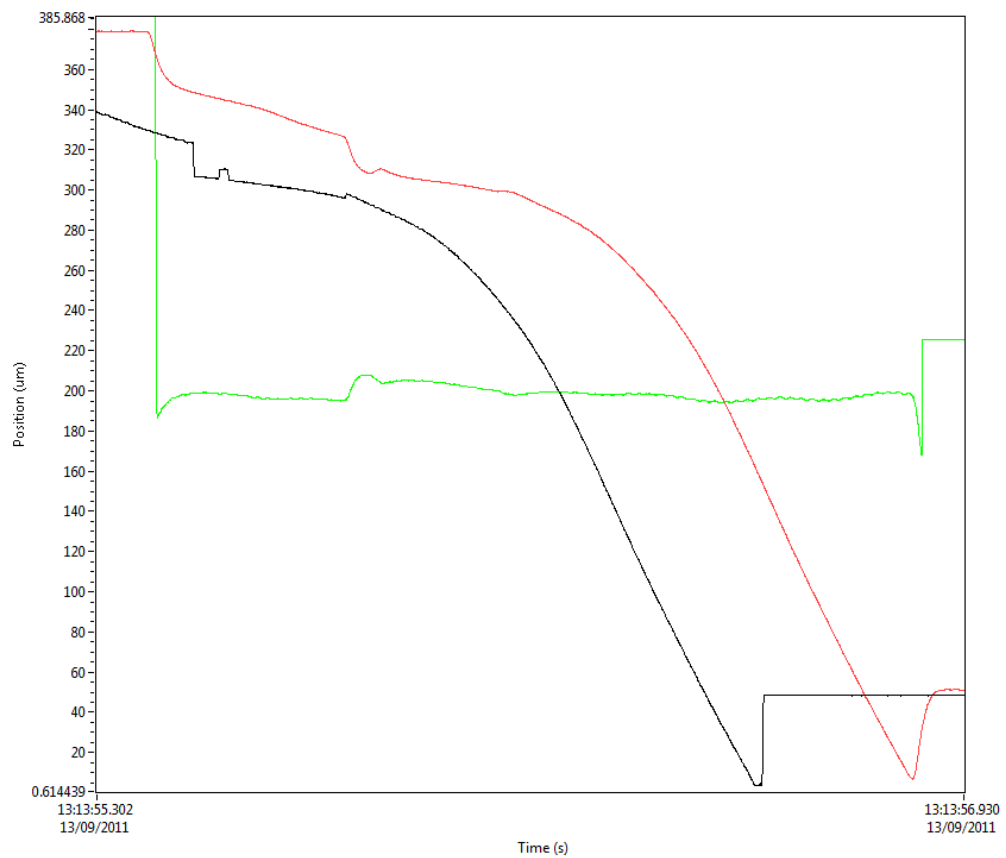
Kiihtyvyyt:	20 m/s ²
Kiihdytykseen ja jarrutukseen kuluva aika:	0,050 s
Nopeus:	0,50 m/s
Anturin ja lasersäteen välinen etäisyys:	0,030 m

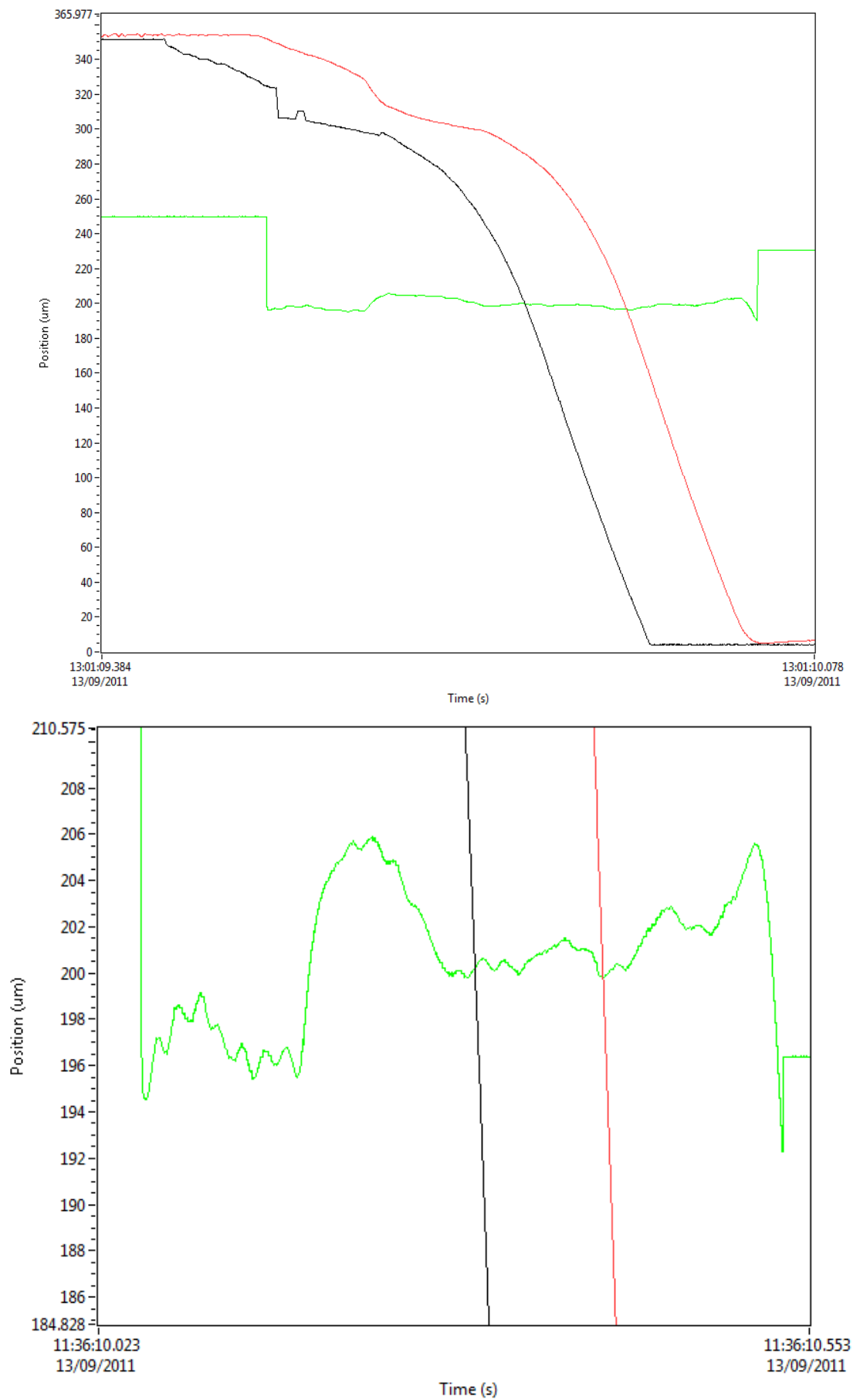
Ajat ilman mittausta			Ajat mittauksen kanssa			muutos (%)
s _{liike} (m)	t _{ura} (s)	t _{kok} (s)	s _{liike} (m)	t _{ura} (s)	t _{kok} (s)	
0,200	0,400	0,450	0,260	0,520	0,570	26,7
0,180	0,360	0,410	0,240	0,480	0,530	29,3
0,160	0,320	0,370	0,220	0,440	0,490	32,4
0,140	0,280	0,330	0,200	0,400	0,450	36,4
0,120	0,240	0,290	0,180	0,360	0,410	41,4
0,100	0,200	0,250	0,160	0,320	0,370	48,0
0,080	0,160	0,210	0,140	0,280	0,330	57,1
0,060	0,120	0,170	0,120	0,240	0,290	70,6
0,040	0,080	0,130	0,100	0,200	0,250	92,3
0,020	0,040	0,090	0,080	0,160	0,210	133,3
0,010	0,020	0,070	0,070	0,140	0,190	171,4

s_{liike}: työliike matka, t_a: kiihdytykseen ja jarrutukseen kuluva aika, t_{ura}: työuraan kuluva aika, t_{kok}: työliikkeeseen kuluva aika, muutos (%): prosentuaalinen kasvu ilman mittausta suoritettusta työstöstä mittauksen kanssa suoritettuun työstöön

LIITE 2: NOPEUSTESTIEN TULOKSET

100mm/s, viive 280ms



300mm/s, 80ms viive

1700mm/s, 0ms viive